



教育部高等学校地矿学科
教学指导委员会采矿工程专业规划教材



丛书主编 古德生

特殊矿产资源开采 方法与技术

刘爱华 李夕兵 赵国彦 编著

TESHU KUANGCHANZIYUAN
KAICAI FANGFA YU JISHU



中南大学出版社

www.csupress.com.cn



教育部高等学校地矿学科 教学指导委员会采矿工程专业规划教材

- 《矿井通风与空气调节》
- 《凿岩爆破工程》
- 《地下采矿学》
- 《露天采矿学》
- 《岩体力学》
- 《井巷工程》
- 《数字化矿山技术》
- 《矿产资源经济学》
- 《矿业系统工程方法及应用教程》
- 《工程机械》
- 《矿产资源评估学》
- 《特殊矿产资源开采方法与技术》

丛书策划/刘 辉 汪宜晔
封面设计/李星星

建议销售分类：采矿工程

ISBN 978-7-81105-829-1



9 787811 058291 >

定价：32.00元

教育部高等学校地矿学科教学指导委员会
采矿工程专业规划教材

特殊矿产资源开采 方法与技术

MINING METHODS AND TECHNOLOGIES
FOR SPECIFIC MINERAL RESOURCES*

刘爱华 李夕兵 赵国彦 编著

中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

特殊矿产资源开采方法与技术/刘爱华等编著—长沙:中南大学出版社,2009.4

教育部高等学校地矿学科教学指导委员会规划教材

ISBN 978-7-81105-829-1

I.特... II.刘... III.矿山开采—高等学校—教材 IV.TD8

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第062922号

特殊矿产资源开采方法与技术

刘爱华 李夕兵 赵国彦 编著

☐责任编辑 刘 辉

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

☐印 装 湖南大学印刷厂

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 16.5 ☐字数 414千字

☐版 次 2009年4月第1版 ☐2009年4月第1次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-81105-829-1

☐定 价 32.00元

图书出现印装问题,请与出版社调换

教育部高等学校地矿学科教学指导委员会
采矿工程专业规划教材

编 审 委 员 会

丛书主编

古德生

编委会委员

(按姓氏笔画为序)

王新民	伍法权	李夕兵	刘爱华	杨 鹏
吴 超	吴立新	张明旭	陈建宏	周科平
赵跃民	赵 文	侯克鹏	姚书振	殷 昆
高永涛	黄润秋	廖立兵		

内 容 简 介

.....

本书在介绍了自然资源的基本组成及其分类的基础上,对矿产资源的传统开采方法和技术进行了归纳总结,并进一步确定了特殊矿产资源的基本类型,分门别类地论述了特殊矿产资源的开采方法和关键技术。

全面系统地介绍了集采、选、冶为一体的化学采矿(溶浸采矿)理论与技术,指出该方法和技术能用于废石中有用成分浸出、尾矿回收、难采、难选或贫矿资源的回采,并给出了工程应用实例。分析了海洋环境下采矿作业的特殊性,重点介绍了海洋基岩矿床的一般开采方法与技术 and 深海表层沉积矿床的海洋船开采理论与关键技术。对于具有水溶性的盐类矿床和具有热熔特性的自然硫矿床,分别介绍了钻孔水溶法采盐和钻孔热熔法采硫的方法与技术。对于松散性强的砂矿床,则主要介绍了用于露天采砂的水力冲采方法与技术以及用于海滨、河滩砂矿床开采的采砂船开采方法与技术。同时,对能有效用于贫煤资源开发利用,既环保又安全的煤炭地下气化技术和工艺进行了介绍。

另外,对于不属于一般矿产资源范畴的地热资源,本书也详细讨论和介绍了其开发利用的基本原理、关键技术和主要工艺流程等。在书的最后部分,还积极展望了极地和太空资源开发利用的前景,讨论了其技术体系的特殊性。

本书可作为高校采矿工程、资源与环境工程、选矿工程等地质类专业的教材,也可作为相关专业工程技术人员参考图书。

站在 21 世纪全球发展战略的高度来审视世界矿业,可以清楚地看到,矿业作为国民经济的基础产业,与其他传统产业一样,在现代科学技术突飞猛进的推动下,也正逐步走向现代化。就金属矿床开采领域而言,现今的采矿工程科学技术与 20 世纪 90 年代以前的相比,已经不可同日而语。为了适应矿业快速发展的形势,国家需要大批具有现代采矿知识的专业人才,因此,作为优秀专业人才培养的重要基础建设之一——教材建设就显得至关重要。

在 2006—2010 年地矿学科教学指导委员会(以下简称地矿学科教指委)的成立大会上,委员们一致认为,抓教材建设是本届教学指导委员会的重要任务之一,特别是金属矿床采矿工程专业的教材,现在多是 20 世纪 90 年代出版的,教材更新已迫在眉睫。2006 年 10 月 18~20 日在中南大学召开了第一次地矿学科教指委全体会议,会上委员们就开始酝酿采矿工程专业系列教材的编写拟题;之后,中南大学出版社主动承担该系列教材的出版工作,并积极协助地矿学科教指委于 2007 年 6 月 22~24 日在中南大学召开了“全国采矿工程专业学科发展与教材建设研讨会”,来自全国 17 所院校的金属、非金属矿床采矿工程专业和部分煤矿开采专业的领导及骨干教师代表参加了会议,会议拟定了采矿工程专业系列教材的选题和主编单位;从那以后,地矿学科教指委和中南大学出版社又分别在昆明和长沙召开了两次采矿工程专业系列教材编写大纲的审定工作会议。

本次新规划出版的采矿工程专业系列教材侧重于金属矿

床开采领域。编审委员会通过充分的沟通和研讨,在总结以往教学和教材编撰经验的基础上,以推动新世纪采矿工程专业教学改革和教材建设为宗旨,提出了采矿工程专业系列教材的编写原则和要求:①教材的体系、知识层次和结构要合理,要遵循教学规律,既要有利于组织教学又要有利于学生学习;②教材内容要体现科学性、系统性、新颖性和实用性,并做到有机结合;③要重视基础,又要强调采矿工程专业的实践性和针对性;④要体现时代特性和创新精神,反映采矿工程学科的新技术、新方法、新规范、新标准等。

采矿科学技术在不断发展,采矿工程专业的教材需要不断完善和更新。希望全国参与采矿工程专业教材编写的专家们共同努力,写出更多、更好的采矿工程专业新教材。我们相信,本系列教材的出版对我国采矿工程专业高级人才的培养和采矿工程专业教育事业的发展将起到十分积极的推进作用,对我国矿山安全、经济、高效开采,保障我国矿业持续、健康、快速发展也有着十分重要的意义。



中南大学教授

中国工程院院士

教育部地矿学科教指委主任

2008年8月

前 言

.....

矿产资源是人类赖以生存和发展的物质基础,如果没有矿产资源,难以想象人类今天的生活会是什么样子。随着人类的不断发展与进步,地球上不可再生的矿产资源,尤其是那些地质赋存条件好、埋深较浅、品位高、容易开采、经济利用价值高的矿产资源已经和正在被大量地开发利用。事实上,人类已经或必将面对越来越严峻的地球资源枯竭、自然生存环境恶化等一系列问题。因此,能否借助新的科学与技术发现新资源,或利用新方法、新工艺提高现有矿产资源的回采率和综合利用率,延长地球矿产资源的使用年限等,已经成为人类能否及时、有效地解决因为资源短缺而带来的各种困扰,以及人类能否继续保持安全、和谐发展和进步的关键。

继续挖掘已有地球资源的综合利用潜力、开发新资源并向极地乃至太空要资源是解决人类能源短缺的根本途径。从现有的科学技术水平和经济效益出发,首先应立足于地球资源,充分利用先进的科学技术和现代化机械装备,深化和拓展现有矿产资源的用途,加大对新型矿产资源和极地资源的勘查与开发利用力度。同时,也应有走出地球、探索太空的勇气,加快开发利用太空矿产资源的步伐。对特殊矿产资源开采方法与技术进行未雨绸缪的研究正是这种大背景下的一项既具有重要理论探索,又具有工程实际应用价值的前瞻性工作。

正因为如此,作为矿产资源开发利用的关键——采矿技术和科学,将在为人类解决资源枯竭问题中起到举足轻重的作用。众所周知,采矿工业是一种重要的原料采掘工业,其实质是一种物料的选择性采集和搬运过程。它涉及破碎、松散物料运移、流体输送、矿山岩石力学、矿业系统工程、环境再造以及资源循环利用等理论。需要运用数学、物理、力学、化学、地质学、系统科学、电子计算机等学科的最新成果。时至今日,采矿技术和科学将不再仅仅是从地壳内或地表开采金属、非金属和煤等矿产资源的技术和科学,当然也应该包括适用于特殊赋存与环境条件下的这些矿产资源开发和利用的方法和

技术——特殊矿产资源开采方法与技术。

一般矿产资源多用传统的采矿方法，即露天开采方法和地下开采方法进行开采。前者是在露天条件下，将埋藏较浅的矿石，从矿坑露天矿、山坡露天矿或剥离露天矿进行开采。后者是将埋藏较深的矿石，在地下采用自然支护、人工支护及崩落采矿方法等将矿石开采出来。但是，也存在一些特殊矿产资源，由于它们在地质赋存条件、有用矿物品位、各种有用成分的比例以及矿物物理化学性质方面具有特殊性，因而传统的采矿方法常常在技术上不能够完成对这些矿产资源的开发利用，或在经济上无法获得相当利润和预期回报，因此，这些特殊矿产资源必须选择和使用特殊的开采方法与技术。这正是本书所要介绍和讨论的内容。

事实上，随着技术的不断更新，设备的不断完善，采矿工业已经有了长足的进步与发展。有的国家已将机器人试用于井下回采工作面，完成对人员损害较大的矿种的开采。同时，为了确保矿山环境不被采矿工程严重破坏，尽可能延长矿产资源及相关自然资源的使用年限，各国制订了强有力的法律，采取有效措施，以便避免或减少采矿和选矿过程中生成的有毒气体、废水、废石和粉尘等物质以及噪声和振动等因素，对环境、土地、大气和水质等造成危害，大力研发废渣、废石、废液的重复使用、破坏后土地复用等技术，为确保地下水系的相对完整与安全，要求开展大水矿区保水开采技术的研究等。然而，随着人类对地下矿产的不断开采，开采品位由高到低，资源紧缺，迫使使用低品位、甚至难采、难选矿产，所以选择特殊采矿和选矿方法，进行综合采选、综合利用，提高矿产资源的利用率和回采率，降低矿石的损失率和贫化率成为必然。

我国是世界主要矿业大国之一。全国已建成国有矿山 1 万多座，集体及个体矿山 20 多万个。我国矿产资源的基本特点：贫矿多，富矿少；难选矿多，易选矿少；共生矿多，单一矿少，矿产资源综合利用率仍然很低，我国矿产资源的综合回收率平均不超过 50%，总体上综合利用率约为 20%。目前我国综合利用搞得比较好的国有矿山仅占 30% 左右，部分进行综合利用的国有矿山为 25% 左右，完全没有进行综合利用的占 45%，全国 20 多万个集体、个体矿山基本上不搞综合利用。与之相反，俄、美、日、法等经济发达国家为加强矿产综合利用工作，都已结合本国的具体情况制定了一些规章制度，以确保国家经济安全的资源供应。有些发达国家提供资金建立专门机构支持矿业投资和开发研究。为吸取“先污染，后治理”的教训，发达国家形成了一套较完备的矿山环境管理和政策法规体系，矿山企业自觉进行

环境保护。

毋庸置疑,要有效地提高矿产资源的综合利用水平,技术是根本,制度和法规是保障。为了缩小我国和世界先进国家在矿产资源综合利用水平上的差距,我们必须借鉴西方国家的成功经验,避免走弯路和重蹈先发展后治理的覆辙,重视科技进步,推动矿业发展趋向于管理集约化、科学化,发展矿产资源的高效、低成本、少污染的选冶加工短流程提取技术,低耗高效矿山装备的大型化、系列化,力求采、选、冶设备自动化和智能化,不断提高资源综合利用水平。同时,重点扶植和发展加工利用中低品位矿石和难选冶矿石的工艺技术及设备研制;完善用于处理低品位难选冶矿石的堆浸技术、生物浸出技术;深化铜、金、铀等金属的地下溶浸和就地浸出的工业化生产;推广极具前景的清洁能源生产工艺的煤炭地下气化技术等。可喜的是,相关部门已认识到研究特殊矿产资源的开发利用方法和技术的战略意义及其重要的实际应用价值,以 863、973 等国家重点计划和攻关科研项目的方式,不仅在政策上提供了开展这方面科学研究的国家级保障体系,也在资金上加大了投入和支撑力度。作者所参与的煤矿突水机理及防治基础理论研究(973 计划项目:2007CB209400)即是其中一项,本书的出版发行得到了该项目的鼎力支持。

本书在介绍了矿产资源及其开采方法相关知识的基础上,以特殊矿产资源的开发利用方法和技术为重点,归纳总结了化学浸矿理论与技术及其应用;海洋开采理论与技术;盐类、自然硫、砂矿床开采技术;煤炭地下气化技术;地热开发利用技术等的基本概念、理论基础、关键技术和主要工艺流程等内容。同时,展望了极地和太空资源开发利用的前景并讨论了其技术体系的特殊性。

作者在编写过程中,参阅了国内外大量参考文献,并融入了自己的一些思路 and 想法,但由于作者水平有限,书中难免有错误或不妥之处,敬请得到读者的批评与指正。

作 者

2009 年 3 月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 矿产资源基本概念与分类	(1)
1.2 我国自然资源概况	(1)
1.2.1 概况	(1)
1.2.2 我国人均资源占有量	(2)
1.3 我国矿产资源开发利用现状	(3)
1.4 我国矿产资源短缺原因分析	(4)
1.5 特殊矿产资源及其开发利用前景	(5)
1.6 特殊矿产资源开采方法与技术的基本内容	(6)
第2章 采矿方法与技术概述	(7)
2.1 采矿方法与技术基本概念	(7)
2.2 传统采矿方法与技术基本分类	(7)
2.2.1 按回采对象的不同进行划分	(7)
2.2.2 按回采工艺的不同进行划分	(8)
2.3 特殊采矿方法与技术基本分类	(13)
2.3.1 化学浸出和微生物浸出采矿法	(13)
2.3.2 海底与极地资源特殊开采	(15)
2.3.3 盐类矿床开采	(18)
2.3.4 砂矿床开采	(19)
2.3.5 自然硫矿床开采	(20)
2.3.6 煤炭地下气化开采	(21)
2.3.7 地热开采	(22)
2.3.8 太空采矿法	(23)
第3章 化学浸矿理论与技术	(26)
3.1 化学浸矿法的实质、意义及前景	(26)
3.2 化学浸矿法的基本理论	(27)
3.2.1 金属矿物化学浸出的原理	(27)
3.2.2 对浸出剂的要求、选择与制备	(31)
3.2.3 矿物可浸性分析	(32)
3.2.4 可浸性试验室试验、半工业试验及生产试验	(35)
3.3 化学浸矿法的分类与工艺	(36)
3.3.1 基本分类	(36)
3.3.2 地表堆浸法工艺	(37)

3.3.3	原地浸出法工艺	(49)
3.4.4	微生物浸矿	(65)
3.5	浸出液中目标金属的提取机理与方法	(71)
3.5.1	概述	(71)
3.5.2	置换沉淀法	(71)
3.5.3	离子交换法	(71)
3.5.4	溶剂萃取法	(73)
3.5.5	活性炭吸附法	(74)
3.5.6	电积法	(75)
3.6	浸出过程控制与浸出效率	(76)
3.6.1	浸出过程控制基本内容	(76)
3.6.2	提高浸出效率的有效方法	(77)
3.7	化学浸矿法对环境的污染及其控制与治理	(80)
3.7.1	造成环境污染的成因分析	(80)
3.7.2	对环境污染的控制与治理	(80)
第4章	化学浸矿理论与技术的实际应用	(83)
4.1	金属铜的浸出	(83)
4.1.1	贫矿或废石中回收金属铜	(83)
4.1.2	铜类矿物的浸出工艺	(83)
4.1.3	铜金属的提取过程	(83)
4.1.4	工程应用	(84)
4.2	金属金、银的浸出	(87)
4.2.1	金银类矿物的可浸性	(87)
4.2.2	浸出剂的选取	(87)
4.2.3	金银的提取过程	(87)
4.2.4	堆浸法采金中的浸金溶液分布技术	(90)
4.2.5	工程应用	(92)
4.3	金属铀的浸出	(96)
4.3.1	溶浸采铀的基本原理	(96)
4.3.2	溶浸采铀的基本工艺流程	(97)
4.3.3	铀的浸出	(97)
4.3.4	铀的提取	(98)
4.3.5	工程应用	(100)
第5章	海洋开采理论与技术	(103)
5.1	概述	(103)
5.1.1	海洋与人类	(103)
5.1.2	海、洋及海底地形	(104)
5.1.3	海洋资源及其分类	(106)

5.1.4 海洋开发相关技术	(108)
5.1.5 我国海洋开发现状	(112)
5.2 海洋矿产资源的开发利用	(113)
5.2.1 浅海矿产资源	(113)
5.2.2 深海矿产资源	(113)
5.2.3 海底基岩中的固体矿床	(114)
5.3 海洋开采理论与技术	(115)
5.3.1 海洋采矿的特殊性	(115)
5.3.2 海洋采矿方法基本分类	(117)
5.4 海洋采矿工艺	(117)
5.4.1 海底基岩矿床开采工艺	(117)
5.4.2 浅海沉积矿床开采工艺	(120)
5.4.3 深海沉积矿床开采工艺	(121)
5.5 海洋船开采系统的基本构成	(123)
5.6 几种常见的海洋船开采方法及基本构成	(123)
5.7 海底提升系统	(138)
5.8 其他海洋开采方法	(140)
5.9 海洋采矿与海洋环境保护	(141)
5.9.1 影响海洋环境的主要因素	(141)
5.9.2 海洋采矿对海底环境的影响	(142)
5.9.3 海洋采矿对海表环境的影响	(144)
5.9.4 海洋采矿对海岸环境的影响	(144)
5.10 国际海洋公约与海洋资源共享	(145)
第6章 盐类矿床开采	(147)
6.1 概述	(147)
6.1.1 盐矿资源概况	(147)
6.1.2 盐类矿床的矿物组成及其特点	(148)
6.1.3 盐类矿产资源分类	(150)
6.1.4 盐类矿床的形成条件、地质特征及分类	(151)
6.2 盐类矿床开采方法	(154)
6.2.1 概述	(154)
6.2.2 盐湖矿床开采方法	(154)
6.2.3 盐类矿床的水采技术	(157)
6.3 几种常见水采技术的基本工艺	(163)
6.3.1 单井对流法	(163)
6.3.2 油(气)垫单井对流法	(166)
6.3.3 水力压裂法	(168)
6.4 岩盐开采的综合利用——石油储库建设	(172)
6.4.1 概述	(172)

6.4.2	发展地下盐穴石油储库	(173)
6.4.3	地下盐穴的储油机理	(174)
6.4.4	地下盐穴的构筑条件	(174)
6.4.5	大力发展盐穴石油储库	(174)
第7章	硫矿资源及其开采	(176)
7.1	硫矿资源	(176)
7.1.1	概述	(176)
7.1.2	硫矿物基本特点	(176)
7.1.3	硫矿物的用途及技术经济指标	(178)
7.2	中国硫矿资源	(179)
7.2.1	中国硫矿资源概况	(179)
7.2.2	中国硫矿资源特点	(180)
7.3	常见硫矿床的地质特征	(181)
7.3.1	硫矿床的时空分布规律	(181)
7.3.2	硫矿床的矿床类型	(182)
7.3.3	硫矿地质勘查	(183)
7.4	硫矿开采	(184)
7.4.1	开拓方式	(184)
7.4.2	技术要求	(184)
7.4.3	选矿与加工	(185)
7.5	自然硫矿床的钻孔热熔法开采	(186)
7.5.1	钻孔热熔法基本要素	(186)
7.5.2	钻孔热熔法的优缺点及适用条件	(187)
7.5.3	钻孔热熔法的开采系统	(188)
7.5.4	钻孔热熔法的采矿工艺	(190)
7.6	硫矿开采与环境保护	(191)
7.6.1	硫对环境与健康的危害及其治理	(191)
7.6.2	硫铁矿对环境的危害及治理	(191)
7.6.3	硫铁矿矿山酸性水对环境的污染及治理	(191)
7.6.4	硫铁矿烧渣的污染与治理	(192)
第8章	砂矿床开采	(193)
8.1	概述	(193)
8.2	中国砂矿资源与开发利用	(194)
8.2.1	中国砂矿资源	(194)
8.2.2	中国砂矿资源的开发利用	(194)
8.3	砂矿床开采方法	(195)
8.3.1	河滩砂矿开采方法	(196)
8.3.2	海滨或浅海砂矿开采方法	(197)

8.4 陆地砂矿露天水力开采	(198)
8.4.1 砂矿露天水力开采的开拓方法	(199)
8.4.2 砂矿露天水力开采的采矿工艺	(199)
8.4.3 砂矿露天水力开采的运输方法	(200)
8.4.4 砂矿露天水力开采的供水	(202)
8.5 砂矿床开采新方法研究	(202)
第9章 煤炭地下气化开采	(205)
9.1 概述	(205)
9.1.1 气化开采发展史简述	(205)
9.1.2 气化开采概念、优势和发展方向	(206)
9.2 煤炭地下气化开采	(208)
9.2.1 煤炭地下气化开采基本原理	(208)
9.2.2 煤炭地下气化开采适用条件	(209)
9.2.3 煤炭地下气化开采的主要优点	(209)
9.3 煤炭地下气化的关键技术	(210)
9.4 煤炭地下气化新工艺	(211)
9.5 煤炭地下气化与环境保护	(212)
9.6 煤炭地下气化开采具体应用	(213)
第10章 地热资源开发利用	(214)
10.1 地热的定义、形成机理及分类	(214)
10.2 地热资源的基本特点	(215)
10.3 地热的基本用途	(215)
10.4 中国地热资源简介	(216)
10.5 中国地热资源开发利用情况	(217)
10.6 地热资源开发利用条件	(218)
10.7 地热能利用技术的基本原理	(219)
10.7.1 常用地热能利用技术	(219)
10.7.2 常用地热能利用技术的基本原理	(220)
10.8 地热资源开发利用技术中的关键——地热井设计与施工	(225)
10.8.1 地热井设计要求	(225)
10.8.2 地热井口装置	(226)
10.8.3 地热利用系统的防腐、防垢	(226)
10.9 地热井施工程序与关键环节	(228)
10.9.1 地热井施工程序	(228)
10.9.2 地热井施工关键环节	(228)
10.9.3 地热井工程的划分	(229)
10.10 地热水开发利用系统基本构成	(229)
10.11 中国地热资源管理体制、法律与制度	(232)

10.11.1 管理体制	(232)
10.11.2 管理法规与制度	(232)
10.12 地热资源开发利用实例	(235)
第 11 章 极地与太空资源的开发与利用	(237)
11.1 极地与太空资源概述	(237)
11.1.1 概述	(237)
11.1.2 南极矿产资源	(238)
11.1.3 北极矿产资源	(238)
11.1.4 太空矿产资源	(239)
11.2 极地资源的开发与利用前景	(239)
11.3 太空资源的开发与利用前景	(241)
11.4 离人类最近的太空资源——月球资源	(242)
11.5 中国开展月球探测的初步规划	(243)
11.6 宇宙资源的终极目标	(244)
参考文献	(245)

第1章 绪 论

1.1 矿产资源基本概念与分类

矿产资源是自然资源中的一种,是指岩石圈内由地质作用形成,技术上可行、经济上有利用价值的自然资源。它们以元素或化合物的集合体形式产出,绝大多数为固态,少数为液态或气态,人们习惯上称之为矿产。

对任何国家而言,矿产资源是其国土资源的重要组成部分,是其国民经济和社会发展的物质基础和人民生产和生活资料的基本源泉。加强矿产资源的规划、管理、保护与合理利用,提高矿产资源的开发利用水平,加大矿产资源保护力度,全面提高矿产资源的经济效益、资源效益、环境效益和社会效益,对促进国民经济快速、健康和持续发展具有重要意义。

按照矿产的可利用成分及其用途,可将矿产资源分为金属、非金属、能源、水气等4种类型(表1-1)。

表1-1 矿产资源的分类

矿产类别		说明
金属类	黑色金属类	能提炼铁、锰、镍、钒、钴、钼、钨等钢铁工业所需原料的矿产资源
	有色金属类	能提炼铜、铅、锌、铝、锡、铋、镁、钛等金属的矿产资源
	贵金属类	能提取金、银、铂等贵重金属的矿产资源
	稀有金属类	能提取锂、铍、铌、钽、铈、汞等元素的矿产资源
	稀土金属类	钪、镧等20种元素
非金属类		富含硫、磷、碘、硼等元素,以及重晶石、石棉、萤石、石墨、金刚石、石膏、滑石、膨润土、高岭土、珍珠岩、硅灰石、蛭石、海泡石等矿产资源
能源类		包括煤、石油、天然气、泥炭和油页岩等由地球历史上的有机物堆积转化而成的“化石燃料”
水气矿产		地下水、矿泉水、二氧化碳气等6种矿产

1.2 我国自然资源概况

1.2.1 概况

中国拥有960万km²国土,仅次于俄罗斯和加拿大,居世界第三位。许多同胞总以为自己的国家“地大物博”、“资源丰富”,却没意识刻在世界范围内人类可开发利用的地球资源总

量在不断枯竭、萎缩,人类总有一天终将面临各种自然资源被消耗殆尽的危机,缺少足够的认识,更不用说未雨绸缪地从现在做起,采取有效的应对措施、制订应急方案。然而,事实上资源危机的乌云曾多次在世界的上空弥漫。比如,1973年、1979年两次爆发能源危机,人类至今惊魂未定。资源危机的冷风也已多次悄悄掠过中国疆土,只是国人至今未有资源危机的切身体会。1988年中国科学院的国情报告昭示,中国正面临着十分严重的资源危机。

不错,我国在一些用量不大的矿产上具有较大的优势,但大宗支柱矿产在世界上的地位却偏低、排名靠后。因此,在我国占优势的矿产中,有相当一部分是用量不多,市场上容量过剩的矿产品,而我国短缺的矿产,却有不少是需求量大的支柱性矿产品。据矿产资源需求预测,到2010年,我国最需要的44种矿产中,只有20种能够自给;而关系到国计民生的用量较大的重要矿产,如铁、锰、铝、铜、铅、锌、硫、磷等,或贫矿多,或难选矿多,或分布于我国西部地区,开发条件差。

据了解,当前我国由于经济的高速发展,对矿产资源的需求剧增,我国每年消耗的矿石量已达50多亿t。2004年我国矿产品及其加工产品进口额已突破1000亿美元,其中净进口石油首次超过1亿t。在世界经济趋向全球化的今天,矿产资源的供求亦趋向全球化,面对我国未来经济与社会发展的矿产资源需要,一方面我们应进入并充分利用国际市场,加强矿业国际合作,以弥补国内某些资源的不足,另一方面要加大基础地质工作和资源勘查力度,提高矿产资源对国民经济建设的保证程度,尤其对关系国家安全的战略资源,要增加战略储备,以保证我国社会经济的可持续发展。

1.2.2 我国人均资源占有量

一个国家是否拥有丰富的自然资源条件,主要从水资源、土地资源、耕地资源、草地资源、林地资源、海洋资源及矿产资源等方面进行评估。评估参数不仅要要看其资源的绝对占有量,更要综合考虑其资源的人均占有量。

可以这么说,我国的资源总量是丰富的,从绝对数上说,在世界上是一个资源大国,但由于我国人口众多,人均资源低于世界平均水平。因此,从相对数来看,我国在世界上又是一个实实在在的资源小国。中国自然资源及其人均资源占有量的相关研究结果表明:

(1) 水资源

中国潜在水资源总量为2.7万亿 m^3 ,在世界上仅次于巴西、前苏联、美国和印尼,绝对量是丰富的,但人均水资源占有量却大大低于世界平均水平,仅列世界第80位。因此,中国的水资源并不丰富,但地下水开采过量,用水浪费,分布不均,供需问题十分突出,中国是缺水大国。

(2) 土地资源

中国土地面积为960万 km^2 ,仅次于俄罗斯和加拿大,居世界第3位,但人均占有土地不足0.01 km^2 ,约为世界平均数的1/3。

(3) 耕地资源

中国现有耕地97.3万 km^2 ,约占世界耕地的7%,居世界第4位,人均耕地约0.001 km^2 ,约占世界平均耕地的36%。

(4) 草地资源

中国草地总面积400多万 km^2 ,居世界第2位,人均草场0.0036 km^2 ,约占世界平均数

的56%。但由于长期重用轻养,超载放牧,盲目开垦草原,退化草原已达可利用草场的1/3,中国是贫草大国。

(5) 林地资源

中国林地面积125.3万 km^2 ,人均林地面积不足0.001 km^2 ,约占世界平均水平的18%。中国是贫林大国,森林面积不断减少,成熟林赤字采伐消耗,森林资源锐减趋势十分明显。

(6) 海洋资源

海洋资源一直是我们引以为自豪的,中国海域辽阔,总计300万 km^2 ;海岸线长,总计32 647 km;岛屿众多,达6 536个;大陆架宽广,黄海、渤海全部位于大陆架上,东海大陆架宽200~600 km,南海大陆架宽180~250 km;深海资源丰富,现有深海面积计14.07万 km^2 ;鱼类繁多,经济鱼类捕捞量400万~470万t;海底石油可观,总面积100多万 km^2 ,石油地质储量100亿t;海滨砂矿床多,达124个,探明储量4.36亿t,可以说各种海洋资源的绝对数量都不少。但与上述情况一样,若按13亿多中国人口的人均计算,上述各项指标在世界上所处的位置仍然是很低的。

(7) 矿产资源

矿产资源可以说是最能体现我国同时作为资源大国与资源小国这个特点的资源种类。根据《各国矿产储量潜在总值》的估算,我国矿产资源储量潜在总值为16.56万亿美元,居世界第三位,但人均矿产储量潜在总值为1.51万美元,只有世界平均水平的58%,排世界第53位,而且人均资源数量和资源生态质量仍在继续下降和恶化。

我国累计发现矿床种类171种,其中探明一定储量的158种,发现矿床和矿化点20多万处,探明储量的矿区1.4万多处。截至1989年底,我国的钨、锑、钼、钛、锌、锂、锡、硫铁矿、稀土、菱美矿、萤石、重晶石、石墨、石膏等矿产的探明储量均居世界首位,铜、钽、铌、汞、煤、石棉、滑石等矿产的探明储量居世界第二、第三位,铁、镍、铝、锰等矿产的探明储量居世界第四、第五位。中国无疑是世界上拥有矿种比较齐全、探明储量比较丰富的少数国家之一,而且矿产的总量也多,45种主要矿产保有储量的价值排到了世界的第三位。虽然如此,但若按人均拥有量计算,我们却还是无法脱掉“贫矿”的帽子。如我国的原油人均占有量为世界平均水平的13%,煤为99.3%,铁为34%,铜为24%,铝为35.3%,锌为58.4%,镍为29%,钴为2.5%,钨为13.9%,锰为18.3%,金19%等。除煤以外,均不足世界平均水平的50%,在世界上排行第80位。虽然我国矿产总的消费需求在不断增加,但人均矿产资源消费量却一直很低,目前,我国人均石油消费只有美国人均数的1/18。

1.3 我国矿产资源开发利用现状

新中国成立以来,我国矿产资源勘查开发取得了巨大成就,初步查明了我国矿产资源的分布特点,发现、勘查和开发了一大批矿床,形成了比较强大的矿业体系。今天,我国稀土、钨、锡等金属矿产和许多非金属矿产储量位居世界前列,煤炭、石油、钢铁的产量也有了快速增长,矿产资源的开发利用已经成为我国社会发展的重要支柱。

然而进入20世纪90年代以来,我国明显进入工业化经济高速增长阶段,许多矿产资源的消费增速接近或超过国民经济的发展速度。

世界资源研究机构和世界铜组织有关人士预测,中国的钢消费在2005年将达到1.8亿

t, 铜消费将达到 260 万 t。2000 年英国一家研究所预测中国的铝消费将在 2010 年达到 745 万 t。多方面资料显示, 国际方面对于中国矿产资源消费需求的预测和近年来实际发生的矿产资源消费数量远远超过了我国自己的估计。有资料分析, 到 2010 年我国现有与人民生活息息相关的主要大宗矿产中, 石油、天然气、铝、铁、铜、黄金、镍、硫、硼、铀、磷、石棉、铬、钾、富锰等无法满足国内需求。到 2020 年我国短缺的矿产资源将增至 39 种, 供需矛盾十分严峻。

我国未来的石油消费已引起国内外的普遍关注。据中国石油天然气集团公司有关专家预测, 我国石油需求量, 2000 年为 1.86 亿 t, 2010 年为 2.68 亿 t, 2020 年为 3.05 亿 t。国际能源机构(IEA)2020 年中国能源展望报告, 预测中国石油需求将以年均 4.6% 的速度增长, 到 2020 年市场份额将大幅增加, 年消费量可达 5 亿 t 以上。国家计委产业经济研究所预测, 到 2050 年, 中国石油需求量将达到 4.5 亿 t, 是目前 1.6 多亿 t 消费量的 2.8 倍。

目前全国可供开采的石油资源量预测为 160 亿 t, 2003 年全国石油年产量 1.6 亿 t 计算, 若每年增长 5% 以上, 2005 年可达 1.85 亿 t, 随后达到 2 亿 t 至 2.5 亿 t 的峰值稳产, 据此估算, 中国石油储量可持续开采 60~65 年。据中国石油天然气集团公司对我国石油供需平衡的预测分析, 国内原油的自给率将从 2000 年的 82% 降低到 2020 年的 60%, 到 2020 年缺口将达到 1.3 亿 t。另据国际能源机构(IEA)预测, 中国石油产量从 2010 年之后开始下降, 到 2020 年石油产量将下降到约 1.01 亿 t/年, 石油进口将达到约 4.04 亿 t/年以上, 成为世界石油市场的主要进口国。

有专家认为: 我国许多矿产资源供应已经不足, 并将在二三十年内面临包括石油和天然气在内的各种资源的短缺, 同时还增加矿产资源对进口的依赖程度。而未来几十年, 随着中国工业化进程的加快以及经济全球化, 中国成为世界重要矿产资源消费大国的趋势不可阻挡。

显然, 与我国未来二三十年主要矿产的巨大需求相比, 我国目前探明的主要矿产储量显得严重不足。我国矿产资源总量丰富、品种齐全, 但已勘查矿产资源中经济可用性差和经济意义不明确资源储量所占比重达 2/3, 可采和预可采储量比例低, 其中 45 种主要矿产可利用的资源储量大幅度减少, 这表明矿产资源对我国经济社会的保障程度正在出现下降趋势。某些重要资源长期依赖进口, 增加了国民经济和社会发展的不确定因素, 也必将影响到国家安全。

1.4 我国矿产资源短缺原因分析

我国矿产资源的发展处于目前这种总量不足、消费量不断快速增加的紧张状态, 致使我国矿产资源现在以及未来二三十年中将面临紧缺局面。究其原因, 大概有以下几方面:

首先, 从对矿产资源的需求和消费角度看, 中国是一个处于工业化中期、人口众多的发展中国家, 目前以及今后相当一段长的时间内正是需要集中大量消耗矿产资源、快速积累社会财富、不断提高人民生活质量和生活水平的时期。中国经济的快速发展是有目共睹的, 这样快速的经济必然对资源消费提出更高的要求。但是, 面对矿产资源消费的不断增长, 与此相对应的矿产资源总储量的增长速度却很小, 甚至没有太多变化。这种储量与消费的不平衡发展势必造成资源的短缺。

其次,在过去20年间,为了满足不断增长的矿产资源需求和受经济利益的驱动,我国的矿产资源开发曾进入过一段前所未有的蓬勃发展期。虽然目前我国政府已经在相关法律法规方面进行了完善,加强了矿产资源开发管理,对许多矿种采取了保护性开采的措施,但一个时期以来对矿产资源的无序和毁灭性开采,已经导致许多地方许多矿产不同程度的浪费以及大量死矿、呆矿的出现,这不仅对国家的资源安全构成威胁,同时也造成了日益严重的环境问题。

第三,新中国成立50多年来,尽管我国的地质矿产勘查工作取得了很大的成就,并基本保障了国民经济建设对矿产资源的需求。但与发达国家和主要矿业大国相比,我国国土上的地质勘查工作程度并不高,资源潜力远未查明。据资料显示,我国已发现的矿化点有20多万个,但仅有2万多处作了评估,其余80%还未作评价。特别是我国西部地区地质找矿工作程度仍然很低,有些地区甚至还是找矿的空白区。目前,国家固体矿产地质勘查投入只相当于20世纪90年代初的1/3,这对我国矿产储量的增长也有很大的影响。

第四,社会公众的矿产资源危机意识仍然有待提高,珍惜资源、保护资源和合理开发利用资源的意识不强。公众对于资源可持续利用和发展了解不多的现状,这也影响了许多矿产资源的回收和再利用,从而造成资源的浪费。

1.5 特殊矿产资源及其开发利用前景

从前面的论述不难发现,中国是世界上矿产资源丰富、矿种齐全、矿产资源总量较大的资源大国之一,但人均矿产资源并不丰富,浪费程度惊人,目前我国对矿产的需求正处于高速增长时期,如不采取有力措施,矿产资源形势将会走向全面严峻。因此,如何科学、合理地解决造成我国资源短缺的实际问题,借助现代科学技术和装备,研究开发更先进的采矿方法、更有效的回采工艺,让已经得到开发应用的矿产资源利用率更高、成本更省、生产更安全,而对目前尚未得到有效开发利用的一些特殊矿产资源,则必须加大综合开发利用研究的力度,变废为宝,最大限度地发挥各种特殊矿产资源的使用价值,只有这样,才能保证我国社会和国民经济的快速、健康和稳定持续发展。

特殊矿产资源主要指下面这些矿产资源:

- ①传统采矿作业产生的副产品,但仍含有一定比例可以利用的有用成分的废石、尾矿;
- ②有用矿物成分品位低的境外矿、表外矿;
- ③传统方法难采难选的矿产资源;
- ④矿体本身形成条件、物理化学性质特殊的矿床,如,砂矿床、盐类矿床及自然硫矿床等;
- ⑤赋存条件特殊的矿产资源,如海底、极地、太空等矿产资源。

特殊矿产资源的开发利用不能完全,甚至不能依靠传统的采矿、选矿和冶炼方法,必须寻求全新的采矿新理论、新方法和新工艺。这一领域中,异军突起的化学采矿和微生物采矿,还有水溶、热熔等采矿方法,不论是在原理研究方面,还是在具体技术应用上都已经取得了可喜的成绩。由于其工艺特殊,能适应特殊矿产资源开发利用的要求,而且生产相对安全,对环境的破坏较少,已成为采矿科学中的重要组成部分。

特殊矿产资源开采方法与技术的存在已有相当长的历史。其中,溶浸采矿法更加历史悠

久。早在公元前二世纪,我们的祖先就记载了铁自硫酸铜溶液中置换铜的化学作用。西方国家在 16 世纪也出现了关于从矿坑水中提取金属铜的记载。至 20 世纪 60 年代以后,浸矿技术在西方得到大力发展,至 80 年代,美国用溶浸法生产铜的矿山,其产量占全美国铜产量的 15%~20%。

特殊矿产资源开采方法与技术的兴起,既受主观因素(人们对该事物的认识水平等)影响,也受客观因素(设备、技术等)制约,但最有说服力的缘由有以下 2 个方面:

①地球资源的有限和不可再生性与人类对自然资源无止境的需求之间的尖锐矛盾促使人们必须重视各类矿产资源的综合利用问题,延长自然资源为人类服务的年限,进而极大地推动了人们在特殊矿产资源开发理论与应用技术研究方面的投入;

②理论水平的提高、现代科学技术的进步、生产装备的改良以及经济观念的变化使原本在技术上不可用或无法开发利用,经济上无利可图的那些特殊矿产资源有了开发利用的空间和价值。

基于上述原因,特殊矿产资源开采方法与技术的研究和推广应用工作必将继续受到世界各国的重视并得到更大的发展和完善,前景相当广阔。

1.6 特殊矿产资源开采方法与技术的基本内容

特殊矿产资源开采方法与技术是针对特定的矿产资源对象、特定的矿床地质赋存条件以及特定的生产加工要求而发展起来的一些独特采矿方法和技术。显然,处理对象物理化学性质的不同、地质赋存条件的差异,都会对采矿方法和工艺提出不一样的要求。由于特殊矿产资源种类繁多,限于篇幅不能面面俱到,本书将选择一些有代表性的、而且在理论和应用上都已经相对完善的领域进行介绍。对于每一种采矿方法,都会从基本概念、原理方法出发,介绍其技术特点、工艺流程、适用范围以及应用上的关键技术等,内容力求完备、系统、先进和实用。

特殊矿产资源开采方法与技术一书的主要内容包括下述 11 章内容:

①绪论;②采矿方法与技术概述;③化学浸矿理论与技术;④化学浸矿理论与技术的实际应用;⑤海洋开采理论与技术;⑥盐类矿床开采;⑦硫矿资源及其开采;⑧砂矿床开采;⑨煤炭地下气化开采;⑩地热资源开发利用;⑪极地及太空矿产资源的开发利用。

第2章 采矿方法与技术概述

2.1 采矿方法与技术基本概念

地球不仅为人类提供了赖以生存的场所,也提供了人类社会、进步所必需的各种自然资源,包括水资源、土地资源、耕地资源、草地资源、林地资源、海洋资源及矿产资源等。从科学的角度来看,每一类自然资源的开发利用都是一项涉及多学科的庞大系统工程,人类为了自身的利益必须开展深入和系统的研究。一方面,采矿科学是人们在长期的矿产资源开发利用实践中不断总结、归纳和提升的,关于如何通过露天开挖、地下开采、化学浸出或其他方式,科学合理地开发利用那些物理化学性质、地质赋存及环境条件等千变万化的矿产资源的理论、方法与技术体系;另一方面,采矿科学所提供的采矿理论、方法和技术又能反过来帮助和指导人们实现矿产资源的安全、环保、经济和高效的开发与利用。

中国是世界开创采矿业最早的国家之一。虽然我国采矿工业目前的发展水平与发达国家相比,还存在一些差距,主要表现在采矿工艺革新、采矿设备更新及矿山企业的优化管理水平方面,但改革开放以来,随着中国经济的复苏与持续高速发展,大大刺激和加快了中国采矿工业的发展和进步。近30年来,中国采矿科学无论在理论、方法还是技术领域都有了长足进步,缩小了与先进国家的距离。

中国有960万 km^2 土地,矿产资源总量丰富,矿床及地质条件类型多样,所使用的矿床开采方法种类繁多,而且还在不断发展之中。本章将对传统的采矿方法以及针对特殊矿产资源的采矿方法和技术进行概括性的介绍。

2.2 传统采矿方法与技术基本分类

传统采矿方法的划分基本可分为两大类型,即按回采对象的不同进行划分,或者按回采工艺的不同进行划分;前者以矿产资源按其物理化学性质和地质赋存条件的异同进行归类,后者则从矿产资源开发时所采用的具体工艺来分类。

2.2.1 按回采对象的不同进行划分

不同的矿产资源或回采对象,其物理化学性质、地质赋存条件肯定不同,比如,同一种采矿方法和工艺肯定不能同时适应煤矿资源、石油、天然气和金属矿产资源等多种资源的开采,因此,采用的开采方法也必须根据具体情况进行具体分析,选择技术上可行、经济上合理、生产安全、有利于环保的采矿方法和工艺。为此,可将采矿方法划分为以下几大类:

- ①煤矿资源的开采方法和工艺;
- ②石油、天然气资源的开采方法和工艺;

- ③金属矿产资源的开采方法和工艺;
- ④其他矿产资源的开采方法和工艺。

2.2.2 按回采工艺的不同进行划分

如果直接根据所使用的采矿工艺技术不同来进行划分,传统的采矿方法也可以大致分为以下几大类:

(1) 地下采矿方法

地下开采方法适应矿床埋深较大的矿产资源,它的重要特点是利用竖井、斜井、平硐等开拓工程,再利用不同水平的采准、切割等巷道达到采矿工作面,实现在地下对矿体进行凿岩爆破作业,并将矿石运出地面,进行选矿和冶炼的加工。整个地下采矿作业,生产环节多,工序复杂,且生产场所随矿产被采出而不断转移,是一项受多种动态参数制约的复杂系统工程,其基本构成如图2-1所示,主要包括竖井、平巷、斜坡道、天井、矿房、矿柱等。因此,要以开采为中心,建立地面及井下生产系统,搞好掘进、运输、提升、通风、排水、动力供应、生产与安全技术管理。

图2-2则为地下开采矿山的竖井井架及采矿巷道照片。

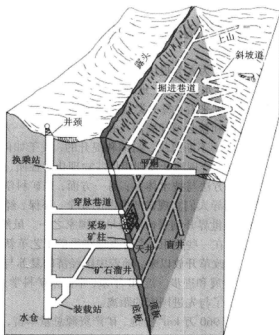


图2-1 地下开采工程基本构成示意图

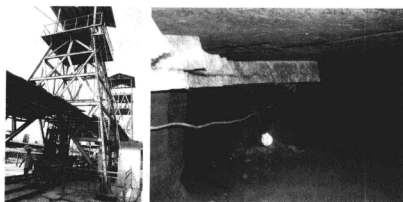


图2-2 地下开采矿山的竖井井架及采矿巷道

矿床地下开采的基本流程可简单地归纳为:

- ①在井田范围内对矿床进行再划分,形成技术上可能的开采单元;
- ②从技术可靠、生产安全、经济合理、资源利用率高等原则出发,确定合理的开采顺序;
- ③开拓:从地表掘进一系列巷道通达矿体,形成提升、运输、通风、排水和动力供应等完整的生产系统;

④采准:在已经开拓的阶段掘进巷道,将阶段划分为矿块,并在矿块内为行人、通风、运料、凿岩和放矿等创造条件;

⑤切割:在已经采准完毕的矿块中开辟自由面和自由空间,为回采爆破和放矿创造条件;

⑥回采:在已经采准切割完毕的矿块中采出矿石。

(2) 露天采矿方法

露天开采就是通过剥离矿体上覆及其四周的岩石,以敞露于地表的采掘空间直接采出有用矿物的矿床开采方法。露天开采由采矿与剥离两部分作业组成,露天采场由露天开采境界(含地面境界、边坡、底部境界线)及边坡(分工作边坡和最终边坡)构成(图2-3 露天采场构成要素;图2-4 露天采场实例)。

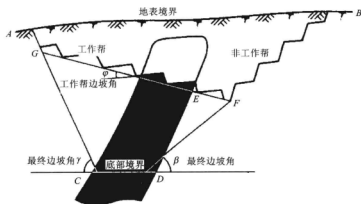


图2-3 露天采场构成要素

与地下采矿方法相比,露天矿开采方法更适合矿床厚度较大、埋深相对较浅的赋存条件,而且具有一定的优势。主要表现在:

①由于露天开采作业是在露天情况下进行,作业场地和空间宽敞,特别适合选择大型矿山机械设备,便于实现采矿作业机械化和自动化,提高矿山生产能力和效率。露天矿的生产规模较地下开采矿山规模要大,劳动生产率较地下矿高2~10倍。

②基础建设工程较少,建设速度快,木材、电能消耗少,开采成本比地下开采低2~3倍。

③露天采矿作业是在敞露于地表的采掘空间中完成,因此,劳动条件、工作环境和生产安全性都能较地下采矿作业要好。

④露天矿开采矿石损失贫化率低,损失率不超过3%~5%,废石混入率不超过5%~10%,矿产资源综合利用率高。

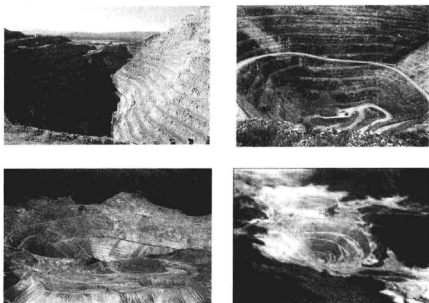


图 2-4 露天采场实例

但露天采矿工程对环境的破坏力度大,郁郁葱葱的丛林山地在露天开采后常常风景不再。目前地球上几何尺寸最大的两个人工坑都是因为露天采矿而形成的。有报道称某露天矿场从坑顶部开车绕旋转的道路抵达坑底,需要花 4 h。尽管如此,考虑到露天开采具有的巨大优势,原则上只要矿山剥采比符合当前的经济技术指标,而且在环境保护条件许可的情况下,一般建议采用露天采矿方法。

露天采矿方法在经济实力雄厚、采矿设备先进、经营管理体系完善的西方国家得到了极大的推广应用。据统计,目前世界上每年从地壳上采出的矿石超过百亿吨,而由露天开采方法采出的矿石量超过 70%。表 2-1 为几个主要国家露天开采在采矿作业中所占的比例情况。

表 2-1 一些国家露天开采量比例情况

国家	铁矿石/%	有色金属矿石/%	煤炭/%
美国	96	88	60
俄罗斯	80	60 ~ 70	60
加拿大	96	63	—
英国	85 ~ 90	—	—
德国	—	—	80
澳大利亚	—	—	70
印度	—	—	70
中国	85	50	6 ~ 7

露天开采的主要缺点:

①对环境的破坏较大。表现在:露天开采境界内所有地表的完全剥离;排土场占地面积大;作业过程中废气、废水、粉尘对周边环境、地下水、空气等污染;

②气候条件对采矿作业影响明显,雨、雪、冰冻、酷暑等均不利于正常作业;

③对矿床赋存条件有严格要求,覆岩太厚或埋藏较深的矿体不宜用露天开采法。

(3)露天和地下联合采矿方法

露天地下综合采矿方法是指同一矿区的矿产资源同时采用两种不同的采矿方法(图2-5),或在不同生产时期分别采用不同的采矿方法进行作业的特殊情况(图2-6)。

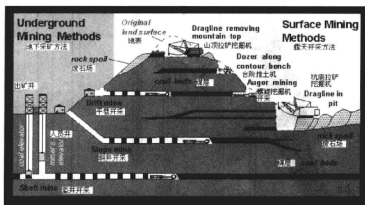


图2-5 露天地下联合开采示意图

露天转地下这类采矿方法的选用,常常是因为矿山在生产过程中,因为技术、经济、管理方法和政策等的变化,对同一矿产资源的开发利用提出了不一样的要求。原定的矿山露天开采生产期限接近尾声时,考虑继续以地下开采的方法开发更大埋深的矿体。

符合由露天转地下开采的矿山常常具有以下特征:

①矿区位于高山地区;

②矿体裸露,或矿体顶部离地表距离较近;

③矿体地下纵深尺寸大;

④露天矿最终边坡因各种特殊原因(经济、技术、环保等)不能外延;

⑤由于经济技术指标的改变,使得原露天开采境界以下的矿体又具有相当好的开采利用价值。

从采矿工艺流程来看,地下露天综合开采系统应该既包含露天开采部分,也应该包含地下开采部分。

如图2-6所示,地下一定埋深以上的矿体用露天开采方法采矿,而埋更深的矿体则用地下开采方法开采。因此,露天转地下开采方法除了包含露天和地下两套完整的采矿系统外,还具有两个显著特征:①露天开采转地下开采时机的科学合理掌握;②两种不同采矿工艺之间的安全平稳过渡问题。

事实上,从这两个基本特征出发,露天地下联合采矿法又可细分为:

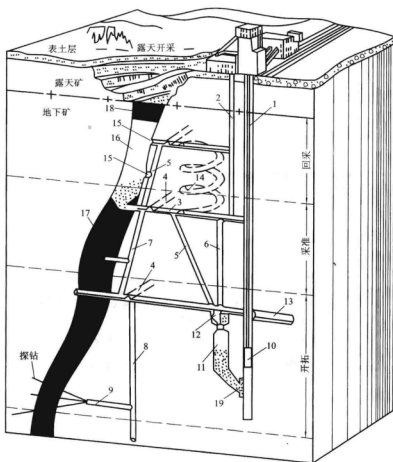


图 2-6 地下露天综合开采系统示意图

- 1—主（副）井；2—风井；3—石门；4—阶段运输巷；5—矿石溜井；6—废石溜井；
7—人行天井；8—盲井；9—勘探巷道；10—箕斗；11—矿石仓；12—破碎机硐室；
13—水泵房；14—斜坡道；15—分段巷道；16—采场；17—矿体；18—矿柱；19—装车站

- ①露天和地下同时联合开采；
- ②露天转地下开采或地下转露天开采；
- ③露天复采地下残矿。

露天和地下联合开采方法在技术层面的问题主要表现在：

①两种作业在空间上相距较近，地下采空区对露天作业安全存在的负面影响，比如，如何解决防止露天矿大型作业设备陷落到地下巷道或采空区？

②采空区的存在会严重影响露天边坡的强度和稳定性，如何保证其安全稳定？

③如何在技术可行性和经济合理性上科学地确定露天开采深度？

④如何确定露天采场和地下开采之间的安全层厚度？

尽管露天和地下采矿法的联合使用存在一定的难度，但如果使用得当，就可以极大限度

地发挥两种不同采矿方法的优点,更好、更合理地利用矿产资源,提高整个矿区的综合开发效益。主要表现为:

①可以科学合理地将地下开拓巷道用于露天矿深部水平的运输、排水以及人员、材料的提运,缩短矿岩运输距离和降低生产成本;

②利用露天矿剥离的废石充填地下采空区,既部分解决排土场用地、保护环境的问题,同时也可降低地下采空区对地表变形和沉降的影响,确保露天边坡的稳定性;

③利用地下开采回采露天矿境界外的残留矿体,或用露天开采回采地下采场的残留矿柱,无疑能更好地提高矿产资源的综合利用率;

④露天和地下可共用工业场地、交通运输设施等,提高矿山企业的综合经济效益。

(4) 其他采矿方法

此外,还有针对一些特殊矿产资源的其他采矿方法,诸如煤田开采法、油气田开采法等。限于篇幅,本书不能一一展开论述。下节对本书将重点介绍的几种常见特殊采矿方法进行简单归类。

2.3 特殊采矿方法与技术基本分类

这里的特殊采矿方法包含两方面的含义:

①从技术层面来看,不同于传统的采矿—选矿—冶金三者独立的工艺流程。这类采矿方法充分利用矿物的化学、微生物等浸出原理,变采矿—选矿—冶金为布液—集液—金属提取一条龙作业的溶浸采矿工艺。

②针对那些无论是在矿体赋存条件,还是其物理化学性质方面都具有特殊性的矿产资源的一些开采方法。

本书将重点介绍以下8种特殊采矿方法:

①化学浸出和微生物浸出采矿法;

②海底与极地资源特殊开采;

③盐类矿床开采;

④砂矿床开采;

⑤自然硫矿床开采;

⑥煤炭地下气化开采;

⑦地热开采;

⑧太空采矿法。

下面先介绍这几种采矿方法的一般概念。

2.3.1 化学浸出和微生物浸出采矿法

化学浸出和微生物浸出采矿法俗称溶浸采矿,是利用某些矿物特殊的物理化学性质,选择相应的特殊溶浸剂,将矿石中的有用成分(目标金属)溶解浸出,形成母液,再利用物理化学方法从母液中提取有用金属的工艺。根据所用工艺的不同,溶浸采矿可分为两大类,即地表浸出法和地下浸出法。

地表浸出法根据其处理对象的不同进一步分为废石堆浸法和矿石堆浸法。两者的工艺流

程基本相似,由筑堆、布液、集液和金属提取四个环节组成(图2-7)。

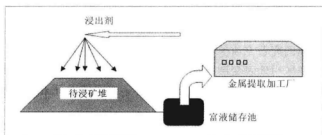


图2-7 地表堆浸法基本构成

地下浸出法的基本原理是利用钻孔将水或其他溶剂注入矿体,将矿体中的固态矿物转化为液态,并通过钻孔或地下坑道将其提出地面,而将矿石中的其他成分留在原地(图2-8)。根据矿体赋存条件的差别,以及矿体本身物理化学性质的不同,为了提高有用成分的浸出率,在进行地下浸出作业前,有些矿体需进行预先松动破碎处理,而有些矿体则无需进行预先松动破碎处理。

显然,溶浸采矿已不是传统意义上的机械落矿或凿岩爆破落矿的普通采矿方法。它可以避免人员必须进入地下作业;无需将矿石整体采出,而是先将其中的有用成分进行分离,采出有用成分,留下其他成分;回采的不是固体矿物,而是含有有用成分的溶液或熔融体。

溶浸采矿的主要优点:

- ①基建工程量少,投资省,见效快;
- ②能实现资源的二次回收(如,废石堆浸),

或开采普通采矿法不能开采或不经济的矿床,如开采深度大(难采)、矿石成分复杂(难选)或品位低(不经济)的矿床;

- ③产品成本低;
- ④采矿工作基本上在地表进行,作业安全、劳动条件好;
- ⑤对地表植被破坏少,有利于环境保护。

尽管溶浸采矿法具有以上几方面的优点,但由于该方法本身存在缺点,因此并不能完全取代传统的采矿方法。这些缺点主要是:

- ①受矿物浸出速度的影响,溶浸采矿法的生产能力较小;
- ②对于适合传统采矿法开采的厚大矿体或高品位矿体而言,溶浸采矿法的矿产资源回收率低;
- ③受矿石物理化学性质和矿体地质赋存条件、地层渗透性等限制,只能用于少数矿床。

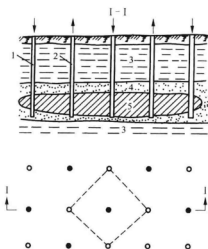


图2-8 地下浸出

1—注液孔; 2—抽水孔; 3—隔水层;
4—含水层; 5—矿体

目前,溶浸采矿已为世界各国所重视,溶浸采矿无论在采矿理论,还是在采矿工艺上都有了显著突破。可以预言,随着人类对矿产品需求量的日益增加,易采易选矿产资源的不断减少,溶浸采矿法必将从主要用于开采岩盐、天然碱、钾盐、芒硝、自然硫、铜、铀、金、银等少数矿产,转向更深、更广的矿产资源综合开发利用领域。

2.3.2 海底与极地资源特殊开采

地球上海洋总面积占地球总面积的 70.8%, 远较陆地面积为大, 海洋是人类消费和生产所不可缺少的物质和能量的源泉。虽然随着科学技术的发展进步, 人类开发海洋资源的规模越来越大, 对海洋的依赖程度越来越高, 同时海洋对人类的影响也越来越大, 但由于国际海洋法、技术装备水平以及经济效益等方面的因素影响, 海水中和海底下蕴藏着的各种矿产资源至今没有能够得到充分开发和利用。考虑到海洋环境的特殊性, 传统的采矿方法, 甚至溶浸采矿这类特殊工艺都不能完全胜任海底与极地资源的开发利用, 必须采用更特殊的工艺——海洋采矿法。

今天, 人类早就从沿海捕鱼、制盐、航行等简单领域拓展到进行海洋采矿、海上采油、潮汐发电等高科技综合开发利用领域。

海底采矿已有一段历史, 如英国从 1620 年起就开始了海底采煤, 但在 20 世纪 60 年代以前, 海底采矿的规模小、范围窄、离岸近。60 年代以后, 海底采矿受到了人们的重视, 特别是海底石油和天然气的开发有了较快发展, 深海锰结核和热液矿床的开发也有迅速发展的趋势。目前, 全世界从海底开采出来的矿物产值以石油和天然气占首位, 达总产值的 90% 以上; 其次是煤, 占 3% ~ 5%, 砂砾和重砂矿占 2% 左右。中国目前正在开采的海底矿物有建筑用的砂砾和钛铁矿、锆石、独居石、磷钇矿等重砂矿以及石油和天然气等, 也已从太平洋底取得了一定数量的锰结核。

海洋固体矿产资源主要有两大类:

- ①海底中的基岩矿床;
- ②海底表层的沉积矿床。

海底基岩矿开采又分非固态和固态矿产资源两类。

对于非固态的石油和天然气开采, 使用的开采工程设施主要为固定式平台, 在平台上钻井采集到油(气)后, 通过输运系统送往岸上; 水深较浅处也有用填筑人工岛进行钻井采油(气)的(图 2-9); 而在水深较大的海域, 多应用浮式平台或海底采油(气)装置进行开采。

固态的煤、铁、锡等基岩矿开采, 一般都从岸上打竖井, 通过海底巷道开采; 也有利用天然岛屿和人工岛凿井开采的, 使作业巷道与海水隔绝, 从而与开采陆地同类矿藏的方法基本相似, 所用机械设备也完全一样。不同之处是海底硐、坑采掘多采用非爆破掘进法, 因此影响采矿速度。但自 20 世纪 70 年代后, 非爆破掘进速度已提高到每小时 4.6 m, 这些采矿业有可能向远离海岸的海区发展。



图 2-9 人工岛进行钻井采油(气)

海底硫磺矿开采,通常采用井下加热熔融提取法。具体做法是,先把加热到 350°F 的海水用泵从边导管注入硫磺矿层,使融化的硫磺液从内套管上升至一定高度,然后用空气提升法采收。

海底钾盐矿和岩盐矿开采,由于钾盐和岩盐也是可溶性矿物,因此也可用溶解采矿法。其技术原理与开采硫磺矿相同,但一般都采取竖井开采。

海底重晶石矿开采,正在开采的美国阿拉斯加卡斯尔海滨矿离海岸 1.6 km,矿脉在海底表土下 15.2 m。由于覆盖层较薄,所以采取了水下裸露开采法,进行水下爆破,然后用采矿船采集炸碎的岩石。

概括地讲,海底基岩矿床的开采方法与陆地水下矿产资源的开采方法有一些相似的地方。较常见的海底基岩矿床开采方法大致可归纳为以下几种类型:

①海岸竖井开拓法。

适合开采离海岸较近的矿床,平巷长度少于 4 km 为宜。

②人工岛竖井开拓。

只适合开采海水深度不超过 50~80 m 的海底基岩矿床。

③海底预制隧道-封闭并筒开拓法。

当海水深度超过 50~80 m,且离海岸线较远时使用。

④热熔采矿法。

当矿产资源具有热熔特性时,可考虑使用。

⑤潜水挖掘机或潜水斗轮铲管道采矿法。

适合深海海底基岩矿床开采。

⑥核爆破-化学开采法。

适合深海海底基岩矿床开采。

海底表层的沉积矿床具有极大的开发利用价值。目前最有开采前景的深海底表层矿,是深海锰结核和多金属软泥。譬如,深海锰结核,除含有大量的锰、铁外,还含有铜、镍、钴等 30 余种金属元素。与陆地锰矿床不可再生不同,海底锰结核每年增生量可达 1 000 万 t 以上,是名副其实的取之不尽、用之不竭的海洋宝藏之一。海底多金属软泥则是富含金、银、铜、铁、锌、锰、铅等的矿藏。此外,还有一种火山熔岩物形成的火山泥。

深海锰结核已被公认为是一种具有商业开采价值的矿产资源,近 20 年来主要在研制低成本、高效率的采矿装置。由于锰结核松散地分布于深海大洋底表层,关键问题是需要找到一种合适的垂直提升装置。目前公认最有希望的有 3 种:链斗式采矿装置、水泵式采矿装置和气压式采矿装置。链斗式采矿装置是在高强度的聚丙烯酯绳上每隔 25~50 m 安装一个采矿庖斗,开采时船首的牵引机带动绳索,使庖斗不断地在海底拖过,挖取锰结核并提升到船上。1970 年 8 月日本已在太平洋水深 4 000 m 处成功地进行了试验。气压式采矿装置,是将集矿头置于洋底,开动船上的高压气泵,高压空气沿输气管道向下,从输矿管的深、中、浅三个部分注入,在输矿管中产生高速上升的固、液、气三相混合流,将经过筛选系统选择过的结核提升至采矿船内,提升效率约 30%~35%。水泵式采矿装置,是将高效的离心泵放在输送管道中间的浮筒内,浮筒内充以高压空气,支撑离心泵和管道浮在水中。由于高效离心泵的作用而产生高速上升的水流,使锰结核和水一起沿管道提升至采矿船内。

多金属软泥也是一种具有开采价值的深海底矿产资源。联邦德国已研制成功一种开采红

海多金属软泥的装备,即在采矿船下拖曳一根2 000 m长的钢管柱,柱的末端有一个抽吸装置。装置内的电控摆筛能搅动像牙膏状的软泥,通过真空抽吸装置、吸矿管,把含有海水的金属软泥吸到采矿船上来,然后经过处理并除去水分,最后即可获得含有32%锌、5%铜和0.074%银的浓缩金属混合物。

海底沉积岩矿床的开采方法大致分为:

- ①浅海链斗式采矿船开采法;
- ②浅海吸扬式采矿船开采法;
- ③浅海钢索式采矿船开采法;
- ④深海连续作业式采矿船开采法;
- ⑤深海间断作业式采矿船开采法。

以上各种海洋采矿方法会在第5章进行详细介绍。这里仅就海洋采矿船开采系统的基本组成进行简单介绍。

图2-10为海底表层沉积矿床采矿船开采系统示意图,该系统主要包括以下4个必不可少的子系统:

①集矿子系统。

由自行式集矿机和水力集矿头组成,还包括结核破碎机和各种测控传感器,用以采集海底结核。

②扬矿子系统。

由扬矿硬管(长达4~5 km)、中间舱、扬矿软管和水力提升泵(长300~500 m)组成。扬矿硬管的上端与船相连接,在水下400 m和800 m处设二级水力提升泵,扬矿硬管的下端与中间舱连接;中间舱中设均匀给料机和结核储存舱;中间舱和集矿机通过扬矿软管相连接。

③测控子系统。

控制采矿作业和结核运送,监测管内的流量、压力和其他各种传感器信号变化,是确保整个系统正常运行的指挥中心。

④水面支持船子系统。

该子系统是采矿作业的工作平台,包括整个水下系统的布放、回收和悬挂,还包括管线和 underwater 系统的储存。

为了满足海洋采矿的需要,水面支持船在设计上必须考虑以下几方面的因素:

①导航和动力定位。

深海采矿作业时,自行式集矿机在海底来回行走,进行结核采集,水面支持船按照预定的采集路线做低速的移动,为了克服风、浪、流等外力和采矿系统水下管线的拖曳阻力,船舶必须提供足够的反向推力。动力定位系统是解决这一问题的唯一技术。

②水下作业系统的布放和回收。

重量可达数百、上千吨的水下作业系统的布放和回收不是一件容易的事情,必须借助经过特殊设计的吊装装置。

③悬挂机构。

采矿水下作业系统在工作时悬挂在船上,为了减少船舶运动时对水下作业系统的影响,



图2-10 海底表层沉积矿床采矿船开采系统示意图

需要考虑各种运动补偿装置。

④ 电站。

动力定位系统和采矿系统需要大量用电,总功率可能达到数兆瓦。因此,利用高压供电成为必要。

2.3.3 盐类矿床开采

盐是人类生存不可或缺的矿产资源之一。盐类矿床更是一种综合性宝贵矿产,其中的钾、碘是我国矿产资源中稀缺的资源。图 2-11 是世界排名第三、阿根廷排名第一的 Salinas Grandes 大盐漠,阿根廷的盐业工人常年在此劳作。每年 4 月至 11 月,当地工人用最传统的挖掘方法在这里挖盐,为矿主提炼精制盐和各种副产品,这使得当地有些地方被挖成了一个巨大的盆地,在盆地表面上还形成了亮晶晶的似镜子一样的盐层,下面是一个巨大的盐湖。

地表的盐湖或盐漠还无法满足人类对盐类矿产资源的需求,还必须开发利用地下的盐类矿床。盐类矿物的基本化学性质是易溶于水,从这一基本特征出发,地下盐类矿床的开采方法主要是钻孔水溶法。

钻孔水溶法利用盐类矿物溶于水的原理,通过在地表完成根据要求设计的疏密相间和深浅交替的钻孔工程,并将具有设计压力和温度的水注入矿层,矿层中的有用组分被水溶解后形成富液,将富液抽出地表进行蒸发浓缩等加工处理,获取 NaCl, KCl, Na_2SO_4 , Na_2CO_3 等化工产品。

目前,世界上 90% 以上的岩盐(钠盐)都采用钻孔水溶法开采。由于使用钻孔水溶法的基本前提条件是开采对象应该溶于水,因此,该方法也可用于开采钾盐、天然碱和芒硝等易溶于水的盐类矿床。

钻孔水溶法分为两种基本类型,即:

(1) 单井对流法(图 2-12a)

在同一钻孔中安装一套管径不同的同心管串,分别担负注水和提取产品溶液的任务,注水管有时还同时担任注入油或气的任务。

注入油或气的目的是为了防止盐层溶解以后顶板过早垮落,影响盐井寿命。其原理是,将油(柴油和石油等)或气(二氧化碳或氮气等)通过注水管注入井下,由于油、气都不溶解盐而且比水轻,注入井下的油或气将在溶腔顶部形成一层具有一定厚度的隔离层,隔离层可以阻止水对盐层顶部过早溶解,并迫使溶腔向水平方向扩展,达到控制溶腔高度、延缓顶板垮落的目的。

(2) 水力压裂法(图 2-12b)

利用水传递压力和溶解盐类矿物的能力,将淡水以高压从注水井注入矿层,压裂矿层并在注水井与出卤井之间形成通道,产品溶液经出卤井排出地表。当矿床含矿不止一层时,按自下而上的顺序逐层开采,盐井逐段报废。

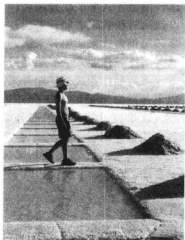


图 2-11 世界第三、阿根廷第一的大盐漠——Salinas Grandes

钻孔水溶法适于矿石品位高、裂隙发育的可溶性盐类矿床,要求矿层顶底板较稳固、难溶于水、隔水性好。该方法投资少、工期短、成本低、效益高、工艺简单、自动化程度高、生产安全、开采深度大(可达1 500 m)等优点。最大缺点是回收率低($<40\%$),矿床埋深较浅时可能引发地表塌陷的地质灾害。

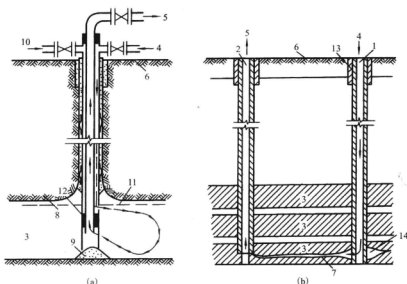


图 2-12 钻孔水溶法

(a) 单井对流法; (b) 水力压裂法

1—注水井; 2—出卤井; 3—矿层; 4—水; 5—卤水; 6—地表; 7—裂缝; 8—溶腔;
9—矿渣; 10—油; 11—油垫层; 12—封隔器; 13—套管; 14—射孔

2.3.4 砂矿床开采

海洋矿产资源常分为表层类矿床和基岩矿床。表层类矿床主要指分布在海滨的磁铁矿、钛铁矿、铬铁矿、锡砂、锆石、金红石、独居石、金、铂、金刚石等重砂矿和砂、砾石等;分布在近海底的磷灰石、海绿石、硫酸钡结核、钙质贝壳和砂、砾石等;分布在深海底的锰结核、多金属软泥、钙质软泥、硅质软泥、红黏土等。海底基岩矿则是指存在于海底岩层和基岩中的矿产,如非固态的石油、天然气和固态的硫磺、岩盐、钾盐、煤、铁、铜、镍、锡、重晶石等。

显然,海滨砂矿属于最邻近海岸线的一类海洋表层矿产资源。海滨砂矿开采的矿物种类多达20几种,如金刚石、砂金矿、砂铂、铬砂、铈砂、铁砂矿、锡石、钛铁矿、锆石、金红石、重晶石等。浅海底主要砂矿如表2-2。

表 2-2 浅海海底主要砂矿

非金属砂矿	建筑用砂和砾石、石灰紫砂和贝壳、硅紫砂、次等宝石、磷改土、霞石、海绿石
重矿物砂矿	磁铁矿、锡石、钛铁矿、铬铁矿、独居石、金红石、锆石
贵重砂矿	金刚石、铂、金

海滨砂矿开采工艺大多采用采砂船进行开采(图2-13)。

针对海底表层矿开采,由于深海与浅海采矿技术的难度不同,因而分为两种:海滩砂矿开采和近海底砂矿开采。

露出水面的海滨砂矿,通常采用露天开采方法。陆地上使用的挖掘机械,如拉杆电铲、钢索电铲、推土机等都可用于海滨砂矿的开采作业。

水面以下砂矿床的开采,目前作业水深大多在30~40 m范围内,使用的采矿工具有4种:链斗式采矿船、吸扬式采矿船、抓斗式采矿船和空气提升式采矿船(图2-14)。前3种的构造和工作原理与挖泥船类似。空气提升式采矿装置由气管、气泵和吸砂管等组成,气管与吸砂管的中部或下端相连通,作业时将吸砂管下端靠近砂矿床,启动气泵,压缩空气使吸砂管内产生向上流动的掺气水柱,从而带进砂矿固体颗粒,连续压气就可达到采矿的目的。这种装置的缺点是作业水深增加时,压缩空气的成本费呈指数倍增长。

此外,20世纪70年代以来还发展了一种海底爬行式采掘机,可以载人潜到海底作业,所需空气和动力由海面船只供应。如意大利制造的C-23型潜水挖砂机的作业水深达70 m,能在海底挖掘宽5 m、深2.5 m的沟,每小时前进140 m,挖砂230 m³。

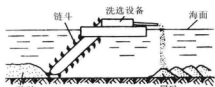
2.3.5 自然硫矿床开采

根据硫熔点低(112.8℃)的特性,自然硫矿床可用钻孔热熔法开采,即通过布置一系列的采硫井、排水井和观察井来实现。其基本原理有些类似于盐类矿床的钻孔水溶法,即通过钻孔将加压过热水注入地下自然硫矿床,使其熔化后,再将熔融状态的硫经同一钻孔排出地表完成采硫作业。通常注水与采硫可以通过布置在同一钻孔内的一套管径不同的同心管串来完成。

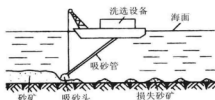
如图2-15所示,加压过热水从采硫井注入矿层,达到矿层后,热作用使硫开始熔化。由于



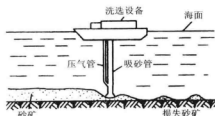
图2-13 某砂矿采场一角



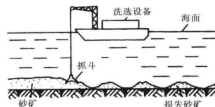
(a) 多链斗采砂船开采



(b) 水力采砂船开采



(c) 压气升液采砂船开采



(d) 抓斗采砂船开采

图2-14 浅海海底砂矿开采

热传递作用,矿层的受热范围将从采硫井井底不断向四周扩展,温度逐渐升高,熔硫量也随之增加。密度大、不溶于水的液态硫在自重作用下源源不断地汇集于采硫井井底,采用气举或泵抽将液硫从采硫管排出地表。

由于注入的加压过热水在使矿层熔化的同时,会降温并失去熔硫的功能,因此,为了保证采硫工艺的正常进行,必须通过排水井不断排出熔硫后的热水,并注入加压过热水,排出的热水经处理后可循环使用。

在整个工艺流程中,排水井除了起到排出熔硫后的热水的作用外,还具有保持和调节层间压力、使矿层卸压和引导热水向一定方向流动的作用。热水在流向排水井的过程中,也起到了预热矿层的作用。

观察井的作用主要是观察熔融范围以外的温度场变化,一般用已采完的采硫井充当。

钻孔热熔法具有与钻孔水溶法相同的优点,并解决了用普通采矿法开采自然硫矿床易产生自然发火的问题。该方法的主要缺点是回收率和热效率低(一般分别为50%~60%和1%~3%),并且只能用于开采自然硫矿床。

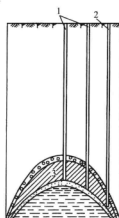


图 2-15 自然硫矿床的钻孔热熔法开采

1—采硫井; 2—排水井; 3—矿层

2.3.6 煤炭地下气化开采

这里讲的气化开采是指将处于地下的煤炭进行有控制的燃烧,直接产生水煤气的新技术。最近几十年来,这一技术在提高与煤相关工艺的效率上具有巨大的潜力,并且能降低相关污染物排放,有效地解决环境污染问题,吸引了世界许多国家进行研究。图 2-16 为国内某煤炭气化开采企业地面设施的景象。



图 2-16 国内某煤炭气化开采企业地面设施

煤炭地下气化工程主要由地面设施、地下气化场以及两者间的连接通道组成。煤炭地下气化开采产业的综合性较强,有效地利用了资源和能源,符合节约型的产业发展原则,利于就近建立综合型的产业群。煤气地下气化过程中,不同生产阶段将获取不同的产品(图 2-17)。

降温处理粗煤气,可利用高温蒸汽发电,或向产业群和就近的城市和

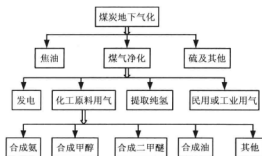


图 2-17 煤炭地下气化生产过程与可获取的产品

农村集中供热,尤其是利用余热发展就近农村的温室绿色农作物产业,改善产销调节。

粗煤气净化过程中可获得焦油和硫产品、酸产品和苯产品,净化后的燃气可以就近进行燃气发电。其中可提取的氢气和氧气,除用作汽化剂外,氢气还是大城市交通清洁能源,有很高的经济价值,市场前景广阔,同时它还是精细化工的重要原料产品。值得一提的是,粗煤气净化过程中分离出来的氮气,可以制成液氮,在油气田钻井和增产措施中具有重要的用途,国内油气田开发中对液氮的需求量亦在不断增大。净化后的煤气是重要的化工原料,由此可制取甲醇,进而制取甲酯和聚甲醛等。此外,净化后的煤气可作为制取合成氨、二甲醚和合成石油的原料。由此,煤气净化不仅使许多的化工原料改变对进口石油和天然气的过度依赖,还利于降低成本、提高市场的竞争实力,且产品具有稳定供给的来源。总之,煤炭地下气化开采的产业综合性越强,开采的成本就明显下降,获取的综合效益就越大。煤炭地下气化开采产业较为灵活,可大、可小,可民营经营、更利于大产业经营,投资少,成本低,投资回收期短,投资利用率高。

煤炭地下气化开采的新趋势在于加大炉型、提高生产能力、提高煤气热值,以1 000 m以下的深部煤层地下气化开采为重点,目标在于建立联合企业,走综合开发利用的循环经济新途径,实施规模化开采。煤炭地下气化开采自主创新技术的潜力很大,不仅煤炭行业,还有石油行业和化工行业,甚至还有更多的院校和科研机构,均将更多地参与到科技创新中去,以适应世界范围内高油价时代的需要,从而缓解进口高价石油的压力,确保国内日益增长的能源需求。煤炭地下气化开采可推动煤炭地下液化开采技术攻关,推动油页岩和油砂矿地下气化开采技术攻关及地表燃煤矿点资源利用技术攻关。

2.3.7 地热开采

地热资源的开发从勘探开始,即先圈划和确定具有从经济上来说可开发的温度、储量和可及性的资源的位置,利用地球科学(地质学、地球物理学和地球化学)来确定资源储藏区,对资源状况进行特征判别及最佳地点选择井位等。地热开发中所用的钻井技术基本上是由石油工业派生出来的。为了适应高温环境下的工作要求,对某些石油钻井的关键技术,例如泥浆钻井,进行了改进,因为那些技术还不完全适用。所使用的材料和设备,不仅需要满足高温作业要求,还必须能适应在坚硬、断裂的岩层构造中和多盐的、有化学作用的液体环境中工作。因此,现在在钻探行业中已形成了专门从事地热开发的分支行业。现在研究人员正在努力研究能适应高温、高盐度和有化学作用的地热环境的先进方法和材料以及能预报地热储藏层情况的更好方法。

大部分已知的地热储藏是根据像温(热)泉那样的地表现象发现的,而现在则是越来越依靠技术,例如火山学图集、评估岩石密度变化的重力仪、电子学法、地震仪、化学地热计、次表层测绘、温度测量、热流测量等。虽然重力测量有助于解释那些情况不明区域的地质学结构,但在勘探初期却不常使用。它们主要用于监测地下流体运动情况。电阻率法测量是主要的方法(现在用得越来越多的是磁力普查),其次是化学地热测量法和热流测量法。

在热液资源调查中,使用电阻率法的最大优点是它依靠实际被寻找的资源(热水本身)的电学性质的变化。其他大部分方法是依靠探索地质构造,但并非所有的地热储藏都完全与任何地质构造模型相符。勘探钻井和试采是为了探明储藏层的性质。如果确定了适合的储藏层,随后就是进行地热田的开发研究,如模拟储层的几何形状和物理学性质,分析热流和岩

层的变化,通过数值模拟预报储藏的长期行为,确定生产井和废液回灌井的井位(回灌也是为了向储热层充水和延长它的供热寿命)。地热水既可以用自流井的方法开采(即凭借环境压差力将热流从深井压至地面),也可用水泵抽到地面。前一种情况下,热流会“闪电般”变成两相(即气相和液相),而用泵抽吸时,流体始终保持为液相。选用什么样的生产方式,要视热流的特性和热能转换系统的设计而定。地热田一般适合“分阶段”开发。在地热田的初期评估阶段,可建适度规模的工厂。其规模可以较小,以便根据已掌握的资源情况,能够很有把握地使其运转起来。通过一段时间的运行,可获得更多的储层资料,为下一阶段开采铺平道路。

其他形式的地热能在勘探阶段还有特殊要求。例如,把流体从地热过压卤水储层中压到地表的力与把天然气和石油从油气层中压出的力有很大的区别,要预测地热过压储层的性能需要有专门的技术。勘测岩浆矿床除了地震方法外,还需要更好的传感测量技术。随着地热环境变得更热、更深及钻井磨削力的加大,对钻井技术要求就越高,所需经费也越多。开采地热过压能需要高压技术和使用稠重型钻井泥浆,勘探开采干热岩体资源需要在非常坚硬的岩体上钻深井和制造一个可使液体在里面循环的人造的热交换断裂层构造,还需要有一个或多个便于流体进出的深井井口装置。现在还没有研究出成功的岩浆钻井技术。岩浆开发将需要专门的钻井技术,以解决钻头和岩浆的相互作用问题、溶解气体的影响问题和岩浆中的热传输机理等各方面问题。

2.3.8 太空采矿法

据天文学家估计,宇宙中已发现约15万颗小行星。近地小行星约2000颗,现已发现700颗。如果能把火星与木星之间所有小行星上的钛、铁、钴等矿产资源加以利用的话,将相当于每一个地球人能够分到200亿美元。可以预言,当人类社会认为月球及其他行星采矿有可能实现之时,就可能是对月球和其他行星矿产资源开始争夺之日。

太空采矿主要是指人类对月球及其他星球矿产资源的开发利用技术与工程(图2-18)。虽然,这种技术的具体实施和实际应用的时期还不会很快到来,但发展空间工业,尤其是月球资源的开采、选矿和提炼是可能的,从战略的高度考虑更是必要的。

虽然月球只是亿万星辰中的小小一员,但却并不是一个普普通通永远围绕地球旋转不停的卫星。对人类而言,月球不仅是人类踏足浩瀚宇宙的前哨站,更是人类赖以生存的资源存储仓库。通过观测和“阿波罗”飞船登月带回的土壤、石块分析,月球尘土有一半是有棱有角的玻璃粉,还发现了从不生锈的铁质颗粒。月球上带回来的尘土撒到地球的细菌上居然能使细菌全都死亡。月球中有火山爆发而形成的玄武岩,证明月球早先有过火山活动。月球资源已被世界所瞩目,有空间技术能力的国家和地区都对月球资源产生了极大的兴趣。



图2-18 人类对太空采矿的期盼

开发和利用月球资源已成为 21 世纪的重要课题。月球的矿产资源极为丰富,不仅拥有地球上最常见的 17 种元素,而且稀有金属的储藏量比地球还多。月球上的岩石主要有三种类型:第一种是富含铁、钛的月海玄武岩(仅月球表层 5 cm 厚的沙土就含有上亿吨铁,而整个月球表面平均有 10 m 厚的沙土);第二种是斜长岩,富含钾、稀土和磷等,主要分布在月球高地;第三种主要是由 0.1~1 mm 的岩屑颗粒组成的角砾岩。月球岩石中含有地球中全部元素和几十种矿物,其中有 6 种矿物是地球上没有的。月球上的玄武岩里钛铁矿的体积占 25%,钛大概有 100 万亿 t 以上。将来人类能直接用这种石头生产水、液氧燃料等资源。地球上稀缺的铀、稀土等,在月球上也相当充足。初步估算月岩中的稀土元素资源量可达 225 亿~450 亿 t,铀的资源量约 50 亿 t。

月球上已发现了储量丰富的氦-3 矿藏。在热核聚变反应过程中,氦-3 与重氢发生热核聚变,可以大大降低热核聚变反应堆的放射性危害,因此这种元素有可能成为 21 世纪热核聚变能的宝贵原料。据科学家估计,月球上氦-3 元素的总储量为 100 万~500 万 t,可以为人类提供上万年的能源,而且它的开采十分容易,只要把月球土壤加热,氦-3 元素就会从土壤缝隙中释放出来。相比之下,地球上的这种矿藏只有 20 t,而且位于地壳深处,要开采它必须耗费大量的人力、物力。另外,利用氦和氦-3 进行的氦聚变安全无污染,不仅可用于地面核电站,而且特别适合宇宙航行。如果把氦-3 作为可控核聚变能源燃料,它将是人类社会长期的、稳定的、安全的、清洁的、廉价的燃料资源,氦-3 资源将有可能成为解决今后地球人类长期能源发展需求的重要原料。采用氦与氦-3 核聚变发电,全中国只需 10 多 t 氦-3,全世界只需 100 多 t,就能满足每年的能源需求。许多航天大国将获取氦-3 作为开发月球的重要目标之一。

太阳能资源无穷无尽,月球上没有空气干扰,大量太阳能可直接传过来。每年到达月球范围内的太阳光辐射能量大约为 12 万亿 kW,假设使用目前光电转化率为 20% 的太阳能发电装置,则每平方米太阳电池每小时可发电 2.7 kW·h,若采用 1 000 m² 的电池,则每小时可产生 2 700 kW·h 的电能。

一旦月球获得开发,就能作为人类进行空间观测、宇宙探索的理想基地。在月球上观测其他星球,能更加清晰地观测到更遥远的地方。氧占月球土壤含量的 40%,飞向其他行星的载人航天器如能在月球上补给氧,在地面起飞时可少带 6/7 推进剂。月球引力只有地球引力的 1/6,又无空气,人类从月球上发射航天器无须克服空气阻力,可节省大量推进剂。

时至今日,人类对月球的研究兴趣早就不仅仅局限在对其矿产资源的开发利用上,月球是研究月球科学、天体化学、空间物理、生命科学、对地观测科学与材料科学的理想场所。

月球表面具有高真空、无磁场、地质构造稳定、弱重力和高洁净的环境,月球背面不受地球无线电波干扰,建立月球天文观测基地、生物制品和新材料实验室,对地观测站和深空探测前哨站均具有重大的政治、军事和科学意义。

在月球上建立天文观测台站可以不受地球大气层的限制,波段可从伽马射线一直到长无线电波段上进行观测。在月球上可以设置一个任何波段的干涉仪阵列,月面上宁静的环境可以保证其测量精度。一些天文物理现象如超新星爆炸和伽马射线爆裂可以用不同波段进行观测研究。

1969 年 7 月 20 日晚,美国“阿波罗”11 号登月舱的 4 条着陆支架终于安全落在被称为“静海”的月球上,美国宇航员阿姆斯特朗在月球上踏下人类的第一个足印(图 2-19)。美国

成为人类历史上目前唯一成功登月的国家。

由于月球具有巨大的特殊吸引力和诱惑力,美国将登月计划停止了30年后重新开始计划实施。2004年1月14日,美国总统布什雄心勃勃地宣布了美国新的太空计划。



图2-19 人类首次登上月球留下的脚印

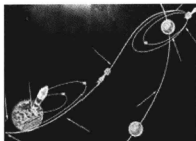


图2-20 “嫦娥1号”发射步骤示意图

综观世界各国21世纪月球探测计划,表明人类有信心以新的姿态踏上月球,与初期月球探测相比,目标更明确,规模更宏大,参与国家更多。月球不属于任何国家,谁先利用它,谁先获益。

重返月球,开发月球资源,建立月球基地已成为世界航天活动的发展趋势和热点。中国在发展人造地球卫星和载人航天之后,开展以月球探测为主的深空探测,是我国科学技术发展和航天活动的必然选择,也是我国航天事业持续发展、有所作为、有所创新的重大举措。“嫦娥1号”绕月工程总投资14亿元(图2-20)。

第3章 化学浸矿理论与技术

3.1 化学浸矿法的实质、意义及前景

在国外,美国和前苏联自20世纪60年代初便开始溶浸采矿技术,特别是溶浸采铀技术的研究,并获得迅速发展。到70年代后期,地浸采铀在美国得克萨斯州、怀俄明州、科罗拉多州、新墨西哥州及内布拉斯加州等地迅速发展。90年代后,地浸法已成为美国铀业生产的主要手段,许多常规矿山不断关停,转入用地浸法开采。1993年,美国只剩下4座地浸矿山在生产,常规铀矿山全部关停。到1996年,用地浸法生产的铀产量已占美国年铀总产量的93%。前苏联由于其具有极为丰富的适于用地浸法开采的砂岩铀矿资源,并且具有良好的地质、水文地质条件,因此,地浸技术发展相当快。其中,1993年哈萨克斯坦用地浸法生产 U_3O_8 1500多t,占该国年铀总产量的54%;乌兹别克斯坦用地浸法生产 U_3O_8 1950t,占该国年铀总产量的75%。其他像捷克斯洛伐克、保加利亚、巴基斯坦、澳大利亚和埃及等国家也先后开展了溶浸采矿技术的开发研究,取得了较好的效果。

中国是世界上最早使用溶浸采矿方法生产铜的国家,早在西汉《淮南万毕述》中就有了“白青得铁化为铜”的描述。解放后,我国在溶浸采矿技术以及溶浸采铀技术领域研究不曾停止,经过几代人的努力获得了相当多的成功。今天,溶浸采矿法在我国同样具有旺盛的生命力,目前我国的常规法铀矿山基本上都已关闭,转入用溶浸法开采。我国的新疆、内蒙古、黑龙江、云南等地都有适合于用地浸法开采的铀资源,所以,原地浸出采铀技术在我国具有广阔的前景。

总之,化学浸矿或溶浸采矿是一种新型的集采、选、冶于一体的新型采矿技术,它对改革采矿工艺、提高采矿自动化与机械化水平、改善作业条件、保护环境、提高矿山企业的经济效益和资源利用率有着十分重要的意义。这种新工艺因为具有投资少、工艺简单、生产成本低、投资见效快、资源利用率高和环境污染小等突出优点,具有强劲的竞争力和旺盛的生命力。

目前,在全世界面临的资源日益贫化的大背景下,溶浸采矿技术作为一种新型的采矿技术,能有效地降低开采边界品位,增大资源量,提高资源利用率,降低生产劳动强度,改善生产环境和矿山周围自然环境,提高经济效益等等。溶浸采矿技术不仅可以应用于铀矿床开采,也可以应用于其他矿床的开采,比如铜矿、金矿、铅锌等有色矿、稀土、盐类矿物等矿床的开采。目前溶浸采矿技术在这类矿山已有很多应用实例。因此,溶浸采矿技术在未来的采矿业中将具有更重要的地位和更广阔的发展应用前景。

溶浸采矿涉及的学科较多,包括水文、地质、采矿、化工、分析、冶金、机电、自动化等。从浸出原理出发,溶浸采矿可分为溶解法和溶浸法。前者在浸出过程中不改变物质成分,只是通过简单的物理溶解作用,将矿物溶解成液体而抽出地表。如岩盐、芒硝(Na_2SO_4)、硫矿

质、钾碱的溶解开采。后者则是将选择好的化学试剂溶液注入含矿层(或喷向矿堆),化学溶液与矿物充分接触,发生化学反应(氧化、溶解作用),从而将矿物溶解(在地下水中)出来。

受浸出原理和技术工艺等限制,溶浸采矿尚存在一定不足,主要表现在:

- ①该方法在应用条件上有严格要求,从而限制了它的使用范围;
- ②浸出过程受浸出反应速度的制约而变得缓慢,致使生产周期较长;
- ③浸出作业过程,尤其是地浸作业过程中产生的有毒有害液体,可能对地下水系统造成污染,矿区地下水系的治理需要较长时间。

随着用常规法开采的矿产资源的逐渐枯竭,以及世界各国的经济发展与进步对矿产资源需求的不断增大,要求大力开展金属矿山溶浸采矿技术的研究开发和推广应用工作,使那些被界定为废石的低品位矿石、难采难选矿石能得到充分利用,以增加金属产量,缓解供需矛盾。今后主要努力方向有:

- ①加强溶浸采矿基础理论的研究;
- ②实现多学科互相渗透、交叉、合作,攻克涉及不同学科领域的理论和技术难点;
- ③加速溶浸采矿的工艺技术、设备、仪器等的不断更新与完善。

3.2 化学浸矿法的基本理论

3.2.1 金属矿物化学浸出的原理

溶浸采矿方法的产生是基于如下的化学反应原理:

有些金属矿物里的目标元素可以被特定的化学溶剂溶解,并生成可溶性金属盐类,从而变固态的金属矿物为液态的金属盐,对后者进行收集(回采)并进行金属提取便能获得所需的金属物质。

金属矿物的浸出过程可以简单地描述为:溶浸液(化学溶剂)在与矿物接触的过程中,有选择性地将矿石或废石中的有用组分溶解到溶液中,并借助液体的流动,使反应生成物离开反应区并汇集成具有一定金属浓度的浸出液,以便进一步提取金属或金属化合物。浸出是一个物理化学过程,即由物理扩散和化学反应两个过程组成。对溶浸而言,浸出速度由物理扩散速度控制的较多。

由于被溶浸的矿石及其中有用矿物成分的物理化学性质不同,适用的溶浸剂也不一样。下面将分别介绍铀矿石的浸出,以及铜、金、银等矿石的浸出过程。

(1) 铀的浸出

主要铀矿石有沥青铀矿、铀石、钙钛铀矿、钙铀云母、铜铀云母、铝铀云母、钾钒铀矿、钒钙铀矿等。

铀矿的浸出方式主要取决于矿石的矿物组成及脉石性质,对于硅酸盐类的矿石,常用的溶浸剂为硫酸,称为酸法浸出;而对于碳酸盐类矿石,常用的溶浸剂为碳酸氢钠和碳酸钠的混合溶液,称为碱法浸出。

如果按浸出工艺和方法进行分类,也可分为原地浸出、就地破碎浸出、堆浸和联合浸出等。

在工业生产中,具体采用何种浸出剂以及哪种浸出工艺和方法,要根据相关试验数据来确定。当待浸矿石为硅酸盐类的铀矿石,主要杂质为二氧化硅、铁氧化物、氧化铝、钙镁化合

物、磷酸盐、钼、钒等，此时选用酸法浸出。理论上，硫酸、硝酸、盐酸都可以作为浸矿剂。

盐酸价格高，对设备、材料等腐蚀性很强，故一般不用。硝酸氧化性强，浸出四价铀时不需另加氧化剂，对铀溶解能力大，但价格较高，且稀硝酸对浸出设备和材料要求很严，特别是在地浸中应用，井孔内设施一旦遭到腐蚀和破坏，维修和恢复十分困难，甚至引起钻孔报废，故一般很少使用。硫酸不仅有较强的浸出能力，与铀反应生成稳定的硫酸铀酰络离子，而且价格低、运输方便、腐蚀性较小、浸出液便于后续工序处理等优点，是较为理想的浸矿剂，被广泛用于工业生产中。浓硫酸可用炭素钢容器转运和储存，浸矿设备和材料可用不锈钢、耐酸陶瓷和塑料等制造。

用硫酸浸出铀矿石时，由于四价铀浸出较难，浸出过程中需要先把四价铀氧化为六价铀，而铀矿石中四价铀往往占有一定比例，所以在铀矿的浸出工艺中往往需要加入氧化剂。下式为六价氧化铀的酸浸反应方程式：



碱法浸出碳酸盐类铀矿石时，常用的溶浸剂为碳酸氢钠和碳酸钠的混合溶液，能选择性地溶解矿石中的铀氧化物。下式为六价氧化铀的碱浸反应方程式：



碱法浸出是利用铀酰离子与碳酸根的强络合作用，浸出过程中对铀有较好的选择性，杂质转入浸出液中的较少。

(2) 铜的浸出

铜的化学活性比金高，它与硫、氧、卤素、硝酸、热的浓硫酸起反应；但与铀相比，铜的化学活性就低，人们一般把铜归结为化学活性低的元素。铀、金、铜在化学活性方面的差异，与它们在自然界存在的矿物形态是一致的。自然界的铀矿物都以化合物形式存在，从未发现单质铀；而金则主要是以自然金的形态出现，很少以化合物形式存在；铜主要是以化合物形式存在，只有少量的自然铜出露于矿石中。铜存在一价和二价两种价态，固态铜化合物中，铜往往是一价的。一价铜在溶液中不稳定，只有溶液中存在能与一价铜络合的离子（如 CN^- 、 Cl^- 等）时，才是稳定的。

铜矿石主要分为铜的氧化矿物及铜的硫化矿物两大类（表 3-1）。

不同类型的铜矿物，具有不同的物理化学性质。

比如，氧化铜（ CuO ）不溶于水，易溶于稀的无机酸，生成相应的铜盐。氧化铜是碱性氧化物，不与碱发生化学反应，但由于铜能与氨形成稳定的铜氨络离子，因此，氧化铜能溶解于氨水-碳酸铵溶液中。

自然界存在的铜的硫化物相当多，是人类获取铜的主要原料。如铜蓝（ CuS ），不溶于水、稀硫酸、盐酸、硝酸中。它不溶于无机酸（稀）中的这一特性，常被人们用来从其他金属元素中分离和提纯铜。

铜盐的种类繁多，在天然的铜矿物中存在有碳酸盐类的孔雀石和蓝铜矿，硅酸盐类的硅孔雀石和透视石，硫酸盐类的胆矾和水胆矾，此外还有氯铜矿等。

与堆浸工艺有关的铜盐，最重要的是硫酸铜，因为从古到今的铜矿堆浸均采用硫酸作为溶浸剂，矿石中的铜均以硫酸铜的形式转移到浸出液中，从浸出液中分离、提纯，直至得到市售产品，都借助于硫酸铜的化学、物理性质来实现。此外，硫酸铜是除电解铜以外，市场上最多的铜产品。

硫酸铜易溶于水,其水溶液呈弱酸性;它的溶解度与温度有关。浸出液中的铜经分离、提纯和富集后,往往经加热蒸发,然后冷却结晶出五水硫酸铜 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$,它在 $93 \sim 99^\circ\text{C}$ 时转变为 $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$,而于 150°C 时变为无水硫酸铜 CuSO_4 。

表 3-1 主要铜矿物种类

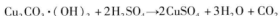
铜的氧化矿物				铜的硫化矿物
铜 盐	氧化铜类	氯铜矿	自然铜	
碳酸铜类: 孔雀石 $\text{Cu}_2\text{CO}_3 \cdot (\text{OH})_2$ 蓝铜矿 $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ 硫酸铜类: 水胆矾 $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ 胆矾 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 硅酸铜类: 硅孔雀石 $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 透视石 $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	黑铜矿 (氧化铜) CuO 赤铜矿 (氧化亚铜) Cu_2O	氯铜矿 $\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	铜 Cu	铜蓝 CuS 黄铜矿 CuFeS_2 辉铜矿 Cu_2S 斑铜矿 Cu_3FeS_4 硫砷铜矿 Cu_3AsS_4 方黄铜矿 CuFe_2S_4

铜的氧化类矿物用稀硫酸为浸出剂,几种不同的铜的氧化类矿物的浸出反应式介绍如下:

蓝铜矿 $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$:



孔雀石 $\text{Cu}_2\text{CO}_3 \cdot (\text{OH})_2$:

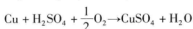


黑铜矿 CuO :

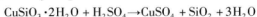


赤铜矿 Cu_2O :

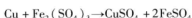
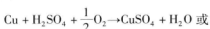
包含下述两步反应式:



硅孔雀石 $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$



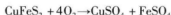
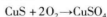
金属铜 Cu :



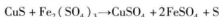
铜的硫化类矿物在酸性氧化条件下溶于水溶液。几种不同的铜的硫化类矿物分别以氧或硫酸铁为氧化剂时的浸出反应式如下:

铜蓝 CuS 和黄铜矿 CuFeS_2 :

①以氧为氧化剂

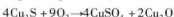
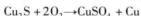
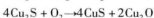
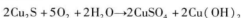


②以硫酸铁为氧化剂



辉铜矿 Cu_2S :

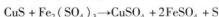
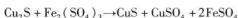
①以氧为氧化剂



可以发现,此种情况的反应式相当复杂。主要反应产物中,一部分铜是水溶性的,如 CuSO_4 ; 而另一部分是不溶性的,如 $\text{Cu}(\text{OH})_2$, CuS , Cu 和 Cu_2O 。后者需要进一步氧化,因此需要氧,或需要酸,或二者都需要,才能进一步溶解。

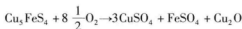
②以硫酸铁为氧化剂

包含两步反应式:



斑铜矿 Cu_5FeS_4 :

①以氧为氧化剂



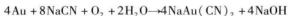
②以硫酸铁为氧化剂



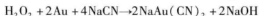
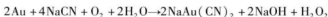
(3) 金、银的浸出

含金、银矿石的浸出,普遍使用氰化物作为浸矿剂,其机理与常规氰化物提金过程的机理基本相同。解释氰化溶液中金、银的溶解理论有很多种,但被热力学计算所证明的是埃尔斯纳的氧论和波特兰德的过氧化氢论。

埃尔斯纳的氧论认为,金、银在氰化物溶液中溶解时的化学反应式为:



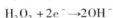
波特兰德的过氧化氢论则认为,金、银在氰化物溶液中溶解时分两步进行,反应式中的过氧化氢 H_2O_2 为中间产物,化学反应式为:



实质上,金、银在氰化物溶液中的溶解类似于金属的腐蚀过程,溶液中的氧被还原为过

氧化氢和羟基离子,金失去一个电子与氰根离子络合成金氰络离子进入溶液中,即

阴极反应为:



阳极反应为:



氰化物剧毒,对环境污染一直是人们关注的问题。国外寻找了新的浸取金、银的浸矿剂,如碘及碘化物。碘对金、银有氧化作用和络合作用,低浓度时还有消毒作用,但碘资源不丰富,不能大量应用。现在仍在研究新的金银浸矿剂,目前应用较广的还是氰化物。

3.2.2 对浸出剂的要求、选择与制备

对于溶浸采矿而言,溶浸剂浓度、氧化剂、孔隙度、渗透系数、渗透速度,矿石的结构、构造及矿物的嵌布特征、竞争矿物等是影响该工艺效果的基本因素。其中,溶浸剂的选择与制备更是决定溶浸采矿工艺能否在工业生产中得到具体推广应用并带来经济效益的重要影响因素之一。因为溶浸剂不仅直接关系到矿物的浸出效率、浸出速度,也密切相关到生产成本的高低、经济效益的好坏。

譬如,有研究表明铀矿石在溶浸剂(H_2SO_4)不同质量浓度时,浸出液中铀质量浓度 $\rho(\text{U})$ 随时间的变化情况如图3-1所示。

可以看出,当硫酸质量浓度增加时,浸出液中铀质量浓度会提高,浸出周期缩短。因此在地浸采铀过程中,通过提高溶浸剂浓度来加快浸出反应的进程是可能的。虽然溶浸剂浓度的提高可加速浸出反应的进行,但并不是溶浸剂浓度越高越好,因为溶浸剂浓度高会造成溶浸剂的不必要消耗,这样不但使溶剂的消耗量增加,造成生产成本增高,经济效益降低;而且由于溶浸剂与围岩等大量反应,使得进入浸出液中的杂质过多,有时甚至产生化学堵塞,降低矿层渗透性,阻碍浸出反应的进行。因此在原地浸出操作时溶浸剂的浓度应适当,不宜过高,一般可以通过试验确定溶浸剂的最佳浓度。溶浸剂选择和最佳浓度的确定是原地浸出操作的关键之一。

从上面的具体例子可以发现,浸出剂的选用必须综合考虑各方面的因素并根据各种相关试验的数据来确定。这些因素主要有以下几点:

①矿石性质,如渗透性、块度、泥含量、硅酸盐含量、碳酸盐含量、硫化物含量、有用组分在矿石中的分布特点、矿石浸出性能等;

②浸矿剂价格合适,易于生产和获得,性能稳定,使用安全;

③浸出液便于后续工序处理;

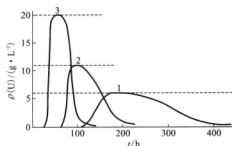


图3-1 $\rho(\text{U})$ 随时间变化曲线

1— $\rho(\text{H}_2\text{SO}_4) = 5 \text{ g/L}$; 2— $\rho(\text{H}_2\text{SO}_4) = 10 \text{ g/L}$;

3— $\rho(\text{H}_2\text{SO}_4) = 20 \text{ g/L}$

- ④工艺溶液能循环使用和再生;
 - ⑤浸出率和生产率高;
 - ⑥对环境污染小,浸出结束后易于地下水复原和恢复生态平衡。
- 而溶浸剂的制备则尽量做到就地取材、就近建厂、定量生产、高效安全。

3.2.3 矿物可浸性分析

溶浸采矿技术经过近半个世纪成规模的开发研究,在理论上和技术上讲已不是问题。但该方法的工业生产使用还受很多其他因素的制约,其中之一便是矿物本身的物理化学性质、结构构造等,它们决定矿物的可浸性,主要指浸出效果、生产效率和经济效益等指标能否达到相应的标准。对矿物进行可浸性评价的主要根据是现场资料以及相关的试验数据。

而现场资料收集和分析是进行矿物可浸性分析的第一步工作,只有当通过对现场资料的分析认为矿物具有可浸性时,才会进一步进行必要的矿物可浸性试验。

因为待处理的对象可以是含有有用成分的废石、剥离或采出的贫矿石,也可能是具有特殊性质和赋存条件的地下矿体,所以要收集的现场资料将各不相同。

对于废石堆浸而言,要求现场了解:

- ①废石或贫矿中的有用成分在当前的技术经济条件下是否具有利用价值;
- ②是否适合用常规的选矿方法进行处理;
- ③矿物化学成分怎样,是否很复杂,伴生物质如何,是否有害;
- ④是否是被遗弃的其他金属仍有回收价值的尾矿、残渣及冶金过程的其他废料;
- ⑤废石块度大小与分布情况;
- ⑥浸垫场地情况(地理位置、地质条件等);
- ⑦筑堆设备情况;
- ⑧其他。

对于矿石堆浸而言,除了要求了解和上面类似的情况外,对矿石本身还要求弄清楚——以含金矿石为例:

- ①金的嵌布粒度大小;
- ②含金成分能否与氰化物发生反应,即矿石本身是否具有天然的孔隙度和良好的渗透性;
- ③抑制金在氰化物中溶解能力的干扰成分;
- ④矿石是否含能吸附金络合物的、或使金过早沉淀的碳质成分;
- ⑤酸性物质含量多少,太多会加大石灰用量;
- ⑥矿石中含细粒和黏土的比例,太高会阻碍溶液的渗透。

对于地下浸出而言,则要求弄清楚:

(1) 矿床地质条件

自然界的矿床赋存条件千变万化,可能是柱状、板状,也可能是三向等长的立方体(图3-2)。

并非每一种地质赋存条件的矿体都能适用溶浸采矿工艺。事实上,对符合溶浸采矿条件的矿体有严格的要求:

- ①顶底板岩石不透水,矿层本身应有一定的孔隙度和良好的渗透性。
- ②与固孔管材强度相适应的矿层埋藏深度,采用酸浸并选用聚乙烯管固孔时,可采深度在200 m以内;而采用苏打溶液或水溶液作溶浸剂时,允许采用金属管或不锈钢管来固孔,

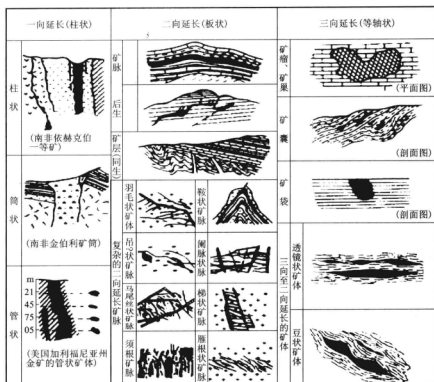


图 3-2 矿体赋存情况分类

此时可采深度可以超过 1 000 m。

③有利的金属富集条件。当大部分金属富集在疏松的岩层中时,有利于原地浸出作业。

④对浸出有利的矿岩物质成分。当矿石的物质成分易溶,而围岩的物质成分不易溶于溶剂时,对原地浸出有利。

⑤能考虑综合回收的多金属矿床。多种金属的综合回收有利于浸出作业经济效益的提高。如以铜金属为主,可能伴生有铅、锌、钴、钼,甚至有硒、锗、金、银等。

⑥有利于环境保护。必须探明矿床的构造、岩石裂隙性、岩溶和洞穴,对浸出作业可能造成的环境污染有能力加以控制,确保化学溶剂不会扩散到远离矿体的地方,不会进入地下水或出露到地表水体。

(2) 水文地质条件

对溶浸采矿效果有明显影响的矿床的水文地质条件主要指矿区水文地质构造,含水层的特征及其静水位,地下水的流向与流速,岩石渗透性,含水层的涌水量及它们的水力联系,隔水层的分布及其特征,层间水的化学成分等。具体地说,应考虑三个大的方面:

① 矿层充水情况。

泄水矿床是干的,将消耗大量溶浸液,因而不适合进行原地浸出。

对于含水矿床,主要考虑矿层的渗透系数、矿层中的承压水压力及砂岩的粒度及其分布。

溶浸剂在矿层中的渗透系数为 1~10 m/24 h,溶渗效率最佳;

合适的承压水压力有利于浸出富液的提取,但压力过高会导致溶浸液在矿层中流速过快,不利于与有用成分的充分接触和完全溶解;

浸出效果最理想的砂岩粒度分布如表 3-2 所示。

表 3-2 对浸出效果最为有利的砂岩粒度分布

粒度/mm	<0.1	0.1~0.25	0.25~0.5	>0.5
比例/%	20	33	24	23

②顶底板岩层及夹层透水情况。

顶底板必须是不透水的,否则会造成溶液漏损、污染环境、富液难于回收。夹层厚度不宜大于 100 mm,否则对浸出作业不利。

③层间水的矿化情况。

层间水对浸出作业的影响主要表现在,矿化的层间水可能与溶浸剂发生二次反应和生成石膏之类的沉淀物质,影响浸出效果。酸浸时,要求地下水的总矿化度不应大于 5 g/L。

(3)物理化学条件

浸矿过程中,溶浸剂能否自由渗透至矿层底部,能否与有用成分有效接触并起化学反应,反应速度如何,都与矿层物质的物理化学条件有直接关系。这些条件包括:矿石的溶解性能、矿物化学成分、矿物在岩石中的存在形式、矿石总孔隙度、矿石和岩石中的试剂容量、矿石和岩石的物质成分等。

衡量浸出过程中化学反应条件优劣的主要指标是溶解度,即被溶解矿物表面积与矿物总面积之比。如果因为溶浸剂发生化学反应而生成新的孔隙,扩大了被溶浸矿物的表面积,则意味着溶解度增大;如果因为反应生成了不溶沉淀物并阻碍了浸出反应的继续进行,则表示溶解度变小。

溶解度应保证在短时间内,使浸出富液中的金属浸出率达到工业标准(如,铜为 400~500 mg/L,铀为 100 mg/L),并且矿石的金属浸出率应达到水冶方法的标准。

层状矿体和围岩中溶浸液渗透的自然条件的好坏由矿石孔隙度、矿体与含水围岩的相互位置、渗透性、厚度、出水率及矿体形态等因素决定。影响矿岩渗透性的主要原因不外乎以下几方面:

①气体堵塞。

如碳酸盐类矿物在酸浸时会析出 CO_2 并产生石膏沉淀,析出的 CO_2 是气体堵塞的主要原因,但因为可以转化成气态或溶解状态,因此造成的堵塞是暂时性的。相反,产生的石膏沉淀会堵塞岩石毛细裂隙而形成不可逆的固定性堵塞。

②化学堵塞。

酸浸时,pH 的变化会引起铝、铁的氢氧化物的形成和沉淀而影响和破坏岩石的渗透性,解决办法是调节酸度使其溶解出来,并呈悬浮状态而逐渐消除。

③机械堵塞。

发生在粒度分布不均匀的岩石中,当注孔附近的渗透速度沿液体流动方向逐渐减小,为固体悬浮物的沉降提供了条件时,便有可能造成堵塞。

④离子交换堵塞。

离子交换堵塞主要与黏土颗粒的膨胀和在溶液中出现钙离子有关。钙离子被黏土中的钠

离子取代,产生石膏沉淀,形成不可逆的固定堵塞。

3.2.4 可浸性试验室试验、半工业试验及生产试验

在决定能否采取溶浸采矿工艺获取有用金属之前,无论是准备采取地表堆浸还是地下浸出的溶浸方式,都必须要进行一些必要的可行性研究方面的试验工作。当然,不同的浸出方式,对矿石和围岩本身的物理化学条件、地质条件、水分地质条件等会有不同的要求,因此,借助试验所要确定的参数的侧重点也不一样。

下面以金矿石堆浸为例介绍生产前所要做的试验及其目的。

前面介绍过,并不是所有含金矿石都适于氰化处理。矿石堆浸在技术上和经济上是否可行,矿石的矿物学特征起着重要的作用。因此,在决定是否采用堆浸采矿之前,必须了解清楚含金矿物的种类、金的粒度、围岩矿物构成情况等准确数据,实现这项工作的基本手段是试验。根据试验规模的大小,矿石可浸性试验分为实验室试验、半工业试验以及生产试验。

(1) 实验室试验——摇瓶氰化浸出试验

通常该实验(如图3-3所示)将400 g矿石磨碎至19目以下,与600 mL水制成矿浆,用氰化物(多为氰化钠,矿浆中氰化钠浓度约为0.1%),并加少量石灰或滴入氢氧化钠(石灰量约为0.9~2.3 kg/t或更多些)使矿浆的pH接近11。连续搅拌瓶中矿浆和药剂72 h,然后化验浸出液和洗涤的尾液,测定金银百分含量,计算药剂需求量。

如果这一试验表明金银浸出率与所用药剂之比是合算的,则继续进行圆柱浸出试验。

(2) 圆柱浸出试验

当摇瓶氰化浸出试验证明金银浸出率与所用药剂之比在经济上是有利可图,则继续进行圆柱浸出试验。该实验的基本构成如图3-4所示。

圆柱浸出试验依旧在实验室进行,是按比例进行扩大试验的可靠指导性试验。

氰化浸出时,把27 kg矿石破碎到各种粒度(粒度范围为50~9 mm),与足够量的石灰混合以保证pH为11。将混合好的物料装进直径约为150 mm的透明塑料圆筒中(为了避免侧壁效应,浸柱直径应是最大矿石颗粒的4倍),直到高约为1.2 m时为止,并在顶部覆盖一层麻布片(能保证氰化液均匀地渗入矿石)。并将1 t氰化液装进圆柱上方的塑料容器中,让这些氰化液按一定速度滴入矿石。定时测量通过矿石的溶液中的金、银含量,氰化物含量和pH。渗滤一直进行到金银浸出率变得很小为止。然后用水冲洗塑料圆筒,并化验尾矿,筛析尾矿,确定矿石各种粒级的金银含量。



图3-3 摇瓶氰化浸出试验室示意图

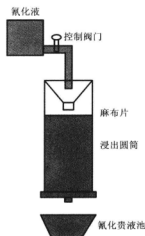


图3-4 圆柱浸出试验示意图

圆柱浸出试验能确定如下一些基本要素:

- ①浸湿矿石所必需的溶液量;
- ②从浸湿过的矿石中排出的溶液量;
- ③排出浸液后矿石的含液量;
- ④矿石破碎块度与浸出时间的关系;
- ⑤氰化物最佳浓度和用量;
- ⑥碱的选择、浓度、用量和 pH;
- ⑦溶解和洗涤速度;
- ⑧矿石浸柱的高度;
- ⑨排液和洗涤的时间;
- ⑩排液中氰含量。

如果对圆柱浸出试验所获得的各项参数进行分析计算后,仍然认为浸出采矿在技术上可行、经济上合算,则应进入半工业试验。

半工业试验可在任何大小的矿堆上进行,但一般选用 100~500 t 矿堆为宜。如图 3-5 所示,半工业堆浸试验由下述部分组成:

- ①浸垫+矿堆;
- ②贵液池;
- ③提升(加压)泵;
- ④活性炭吸附柱;
- ⑤贫液池;
- ⑥喷淋系统。

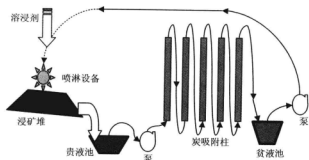


图 3-5 半工业堆浸试验示意图

半工业试验是进行大规模工业生产的最后一道门槛,进行试验时,要求物料粒度尽可能模仿生产浸堆的实际情况,能获得以下几方面的数据:

- ①确定布液方式;
- ②验证给液速度;
- ③矿堆的物理要素;
- ④全面验证圆柱浸出试验要素;
- ⑤浸出条件下矿堆的密实情况。

3.3 化学浸矿法的分类与工艺

3.3.1 基本分类

溶浸采矿法按其浸出机理和方法的不同,又分为堆浸法、地浸法、原地破碎浸出法和联合浸矿法四种。

(1)堆浸法

先用常规法采出矿石,然后进行筑堆浸出金属。堆浸法按其工艺特点又分为两种:

①非筑堆浸出法——向露天排矿场或废石直接喷淋浸出(图3-6)。

②筑堆浸出法——即要对矿石先进行筑堆,然后再喷淋浸出。筑堆浸出法又分为:地表堆浸法和井下堆浸法两种。

(2)原地浸出法(简称:地浸法)

所谓原地浸出采矿法,是指矿石处于天然埋藏条件下,没有经过任何位移,而是通过注液钻孔将配制好的溶浸液注入含矿层中,溶浸液与矿物充分接触,发生化学反应和溶解作用,从而将固相矿物转变为含有用矿物成分的液相物质汇入含矿含水层中,经抽液钻孔抽至地表,经水冶厂处理成所需矿物产品。

图3-7是地浸法采盐的基本工艺流程。

(3)原地破碎浸出法

这种方法即是在露天或井下,利用补偿空间采用爆破手段将矿体崩落、破碎至合适块度,并形成自然矿堆,再对矿堆进行布液、喷淋、浸出,浸出的含有用成分的溶液经集液系统收集后,送到水冶厂加工处理成矿物产品。

(4)联合浸矿法

对于某些矿体而言,单一的浸出采矿方法不能完全满足生产要求,此时,可能用到除堆浸法以外的两种或两种以上的浸矿法(即地浸法和原地破碎浸出法)联合开采一个矿块,这种方法称为联合浸矿法。

3.3.2 地表堆浸法工艺

3.3.2.1 概述

地表堆浸法是应用最早也最广的一种溶浸采矿方法。根据处理的对象不同,又分为废石堆浸和矿石堆浸。

废石堆浸主要用于处理露天矿生产中剥离的,品位在境界品位以下,但仍具有一定回收利用价值的废石。废石堆浸时,一般不对废石的块度进行特殊要求,因此,不进行二次破碎处理,堆浸的量可达数十万t,甚至数亿t。废石堆底板一般是按一定标准选择的自然地面,不进行特殊施工,浸出条件简陋,效率较低,浸出周期较长。

以铜矿废石堆浸为例,其基本的工艺流程如图3-8所示。

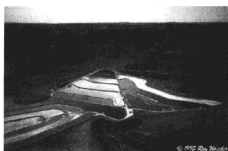


图3-6 美国 Moab 附近沿科罗拉多河岸的钾盐溶浸采矿场(Ray Wheeler, 1995)

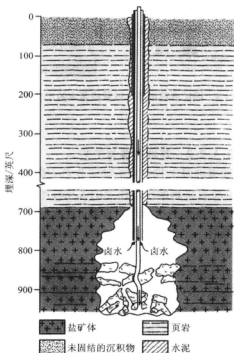


图3-7 溶浸采矿工艺流程图(Myers, 1972)

矿石堆浸则主要用于处理一些品位低的贫矿，或化学成分复杂无法用常规选冶方法处理的矿石。矿石堆浸一般仍具有相当可观的经济效益，因此，为了保证矿石堆的构成成分与块度较均匀，提高矿石堆的浸出效率，对矿石堆浸原料通常还需进行破碎、分级或制团预处理。同时，为了方便贵液收集，提高贵液回收率，浸出作业底板一般需进行必要的平整施工并采取防漏措施。正因为如此，矿石堆浸作业较废石堆浸的浸出效率要高、浸出周期要短。

图 3-9 为金矿堆浸-活性炭吸附流程图。

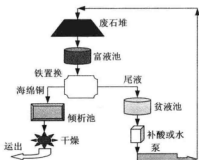


图 3-8 铜矿废石堆浸-铁置换基本的工艺流程

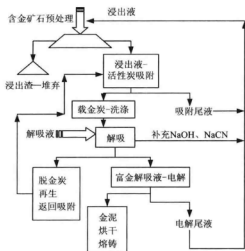


图 3-9 金矿堆浸-活性炭吸附流程图

3.3.2.2 筑堆设备与工艺

地表堆浸工艺中的关键环节之一是废石或矿石的筑堆，能否科学合理地完成浸出物料的筑堆，将直接影响浸出作业的各项技术和经济指标。

堆浸场地的选择相当重要，应充分利用矿区地形地貌和地质条件，选择不渗漏、单面或双面具有一定自然坡度的地段（如山脊或山谷等）。

(1) 废石堆浸

对于废石堆浸而言，为节省生产成本，浸垫一般只需稍作平整，除非岩层透水性太大，经济效益允许的条件下，才对废石堆浸垫进行专门的地表修整。

浸垫建造的一般步骤：

- ① 铲除植被，形成一定坡度，并进行压实；
- ② 铺矿渣，矿渣粒度 < 40 mm，厚度约 100 mm；
- ③ 沥青垫层：在铺完头道沥青的基础上，铺厚约 80 mm 的厚实沥青层，再喷约 3 mm 的沥青密封层；
- ④ 铺 300 mm 的细粒废石，以防止大型机械设备行驶过程中损坏沥青垫层；
- ⑤ 最后铺 1.5 ~ 2 m 的粗粒废石，能防止大块岩石沿废石堆顺坡滑落时破坏浸垫。

废石堆的堆置，与常规的排土方法大同小异，一般用汽车或列车从露天采场运往堆浸场地。对于大中型废石堆，通常采用分层排卸，排土台阶高度一般在 15 ~ 30 m。

废石堆形状因堆浸场地的变化而变化，但一般为截头锥体。废石堆的坡度一般就是该物

料和粒度所特有的休止角。这里的物料是露天矿正常作业中产生的废石或贫矿,其块度与所用的挖掘设备铲斗容积有关,重的可达数吨,更多的直径在半米左右。当然,通过对爆破参数的控制,能很好地降低大块率。

在施加溶浸剂之前,根据所选用的喷淋方法,废石堆顶部须进行必要的平整和其他准备工作;比如,将废石顶部划分成大小适当的储液池(15 m×15 m或5 m×12 m),或开挖沟渠,有时为了减少废石堆过大的溶液渗透速度,可在废石堆顶部铺上一层选矿尾砂。

值得指出的是,废石堆在浸出作业过程中,由于溶浸液会将一些较细的物料颗粒搬运到大颗粒物料的间隙当中,加上废石堆本身的重力变形以及废石堆中矿物的溶解和瓦解等原因,会产生沉实现象。

(2) 矿石堆浸

矿石堆浸中的矿石筑堆原理与工艺,与废石堆浸中的筑堆原理与工艺大同小异,但由于矿石堆浸中的物料粒度较细,分布也更均匀,因此更有利于溶浸剂的渗透,同时,矿石堆浸物料中的有用成分的品位比废石堆浸物料中的要高,也就说具有更高的经济利用价值,因此需要尽可能提高有用成分的回收率。其主要途径不外乎:首先,通过改善浸出技术与工艺,提高有用成分的浸出率;其次,通过构筑防渗透性优良的浸垫和完整的浸出富液收集系统,尽可能减少富液损失率。

改善浸出的重要手段之一是控制矿石的块度分布。研究表明,粒径越小,浸出速度越快,比如,用粒级25~50 mm的与≤5 mm的金属矿石浸出12 d,其浸出率分别是29.58%和97.88%。当然,在进行具体堆浸作业时,矿石粒径并非越细越好,这不仅牵涉到矿石预处理的成本问题,还与浸出过程的控制技术有关,比如粉矿过多,反而可能造成浸出液通道的堵塞,进而影响整体浸出速度和浸出率。国内堆浸金矿石的粒度一般控制在50 mm以内,并要求粉矿≤20%;国外许多堆浸矿石的粒度控制在19 mm以内,浸出效果良好。

矿石堆浸中浸垫的建造要求也更高。黏土、砂子、砾石、藻土、尾矿、沥青、钢筋混凝土、塑料薄膜、橡胶板、PVC材料等都可能用于浸垫的建造。根据不同的使用目的,矿石堆浸垫有一次性浸垫和可重复使用的浸垫。前者用黏土或塑料薄膜建造,成本低,适于矿量少或一次性堆浸。如黏土浸垫,强化塑料膜浸垫;后者为满足用于多次浸矿的要求,必须坚固耐用,多用钢筋混凝土建造,成本高。如热轧沥青浸垫,钢筋混凝土浸垫。

① 黏土浸垫。

在平整好的地基上铺约460 mm厚的黏土并夯实,再铺150 mm砂子,然后加铺并现场拼接一层塑料薄膜,最后在膜上盖一层细砂。当然选用的浸垫材料必须能承受生产中将采用的碱度和水量,真正起到防渗漏作用。

② 强化塑料膜浸垫。

在压实的地基上直接铺上150 mm砂垫层后,加铺并现场拼接一层塑料薄膜,并在膜上盖一层细砂。

③ 热轧沥青浸垫。

设计的依据是:所建造的浸垫必须承担装载机轮胎传递的最大载荷。比如,根据6 m³前装载机设计的浸垫为:先铺一层约50 mm厚的沥青,再涂一层密封胶,然后铺上100~150 mm热轧沥青。

④ 钢筋混凝土浸垫。

以钢筋混凝土建造,为防龟裂,场地内要留伸缩缝,并以沥青填充防渗漏。

堆浸场地的选择应遵循以下的一些原则:

- ①靠近矿源,节省各项运输成本;
- ②靠近水源,溶浸采矿是一项需大量用水的工艺,充足的水源至关重要,因为水不仅是该工艺成功使用的物资保证,也是影响生产成本的重要因素;
- ③合适的自然坡度,以5%~8%为宜,科学合理地运用高差带来的势能,能够更好地保证浸出作业的顺利进行,同时,能有效地节省物资运输过程中的电能等损耗,提高经济效益;
- ④地基坚固、使用面积宽敞;
- ⑤有合适的尾渣库,保证安全、环保;
- ⑥交通方便,供电条件好。

图3-10为一典型堆浸场地地形剖面示意图。

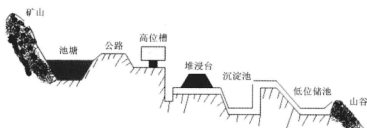


图3-10 典型堆浸场地地形剖面示意图

与废石堆浸中浸垫的建造类似,矿石堆浸中浸垫的建造一般步骤如下:

- ①铲除植被,形成一定坡度(5%~8%),并进行压实。
- ②在垫基的低侧建筑坡度为1%~3%的排液沟,并在排液沟下侧修筑能容纳矿堆排出的液量和当地最大降雨量的富液池、贫液池和溢流池。

③为了防止塑料薄膜破损,在铺塑料薄膜之前,先在垫基上及池底铺一层细砂或砾石并夯实,然后现场拼接使塑料薄膜覆盖整个垫基与池底。

④为防止矿石的棱角扎破塑料薄膜,还要在塑料薄膜上铺一层砂子。

⑤为防止溶液外溢,在场地周边修筑宽约400 mm、高约300 mm的防护堤。为排出降雨径流,在堤外挖掘适量的排水沟。

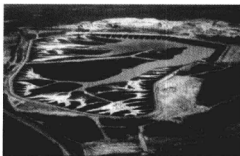


图3-11 经过防渗漏处理的堆浸池实例

图3-11为一经过防渗漏处理的堆浸池实例。

矿石筑堆过程中,需确定的主要参数有矿堆高度和堆量。矿堆高度对浸出周期及浸垫面积的利用率有直接的影响,高度大,浸出周期长,浸垫面积利用率得到提高。但从提高浸出效率、缩短浸出周期、保证矿堆有较好的渗透性来综合考虑,矿堆高度以2~4 m为宜。矿堆的堆量与生产规模及筑堆的设备有关。国内及北美矿石堆量统计数据如表3-3所示。

表 3-3 国内及北美矿石堆量统计数据

矿堆规模				
中国	北美			
0.3 万~0.5 万 t	<5 万 t	5 万~10 万 t	10 万~30 万 t	>30 万 t
	50%	17%	16%	17%

矿石的筑堆方法较废石的筑堆方法要复杂一些,也更多样化一些。常见的矿石堆浸工艺有:多层筑堆法、多堆筑堆法、斜坡筑堆法和移动桥式吊车筑堆法。

(1) 多层筑堆法

在浸垫上按 1.5~3 m 的分层厚度完成筑堆。分层的数量根据实际情况确定,如果矿石粒度较细,经一次浸出就能到达额定浸出率,则可考虑单层浸出的方案(即堆一层,就浸出一层,接着就将废渣运出,如此反复直至完成所有矿石的浸出作业),否则可考虑采用双层、三层甚至更多层的浸出方案。

多层筑堆法的筑堆设备主要为履带铲运机、前端式装载机、卡车、推土机等。为了确保矿石堆物料的均匀性和良好的渗透性能,一般建议采用能有效避免矿堆被过分压实的履带铲运机,而采用轮胎式装载机或自卸汽车,配合推土机完成筑堆工作,必要时可采用松土机将被压实的矿堆表面进行松动处理。

图 3-12 是在浸垫上进行筑堆的示意图。基本流程是在浸堆末端建一条通向矿堆总高度的外通道,自卸汽车从横贯整个浸垫宽度的坡道行驶,汽车将矿石后卸到浸垫上,并用推土机推成理想坡度。当完成一层矿石筑堆后,为确保矿堆良好的渗透性,将堆顶进行必要的松动处理,并沿着堆顶筑一条护堤以防止溶浸液流失而冲刷堆帮。在筑堆第二层矿石时,汽车通道建在现存矿堆的顶部,沿着矿堆的宽度方向将矿石分排卸下,并用推土机将它们推到一起形成新的矿石层。同样,为确保矿堆良好的渗透性,堆顶需进行必要的松动处理,并沿着堆顶筑一条护堤以防止溶浸液流失而冲刷堆帮。

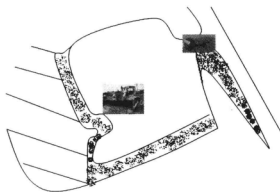


图 3-12 多层筑堆法示意图

(2) 多堆筑堆法

如图 3-13 所示,多堆筑堆法是用带式输送机堆筑一定数量具有一定高度的矿堆,然后用推土机将堆尖推平至设计矿石堆理想高度。

该方法优点是效率高,避免筑堆设备在矿堆上的反复行走,因此,矿堆不易被压实。但由于作业过程中,矿石靠自重作用在成堆的过程中自然离析,大块滚落堆底,越往上颗粒则越细,导致整个矿堆出现上下不一样的渗透性,使溶浸液不能均匀地流过整个矿堆,进而影

响到浸出效果。

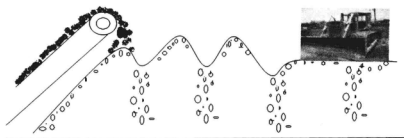


图 3-13 多堆筑堆法示意图

(3) 斜坡筑堆法

如图 3-14 所示, 在铺好的浸垫上首先用废石修筑供运矿卡车行驶的斜坡道及高出设计矿堆高度 0.6 ~ 0.9 m 的道路。卡车向车道尽头及两侧卸矿, 并用推土机将矿石推排到道路两侧, 直至矿堆筑成为止。

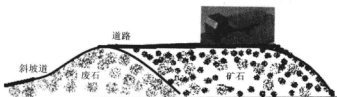


图 3-14 斜坡道筑堆法示意图

该方法由于修筑了卡车专用道路, 因此避免了重型运输设备在矿堆上的来回行驶, 能有效地保证整个矿堆良好的渗透性能, 有利于溶浸液在整个矿堆中均匀流过, 提高浸出效率。

(4) 移动桥式吊车筑堆法

该方法借助移动式吊桥来完成矿石筑堆工作(图 3-15)。吊车在移动过程中, 矿石通过卸矿口堆置到预定位置。该方法的最大的特点是最大限度地减少了矿堆的压实程度, 保证了矿堆的良好渗透性。但该方法筑堆效率较低, 且成本相对较高。

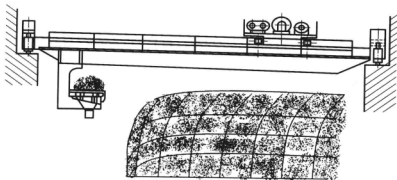


图 3-15 移动桥式吊车筑堆法示意图

图 3-16 为国内某金矿堆浸场的照片。

值得指出的是,在矿石堆浸作业实践中,为了有效地提高矿石堆的渗透性能,对那些含有较高比例细粒和黏土的、具有较大经济价值的金属矿石,可进行制团预处理,使之成为形成稳定的多孔的矿团。矿团的多孔性,使溶浸液能均匀浸出矿物的有用成分,提高浸出速度和金属浸出率。

制团方法多为在矿石中添加一定比例的粘结剂和溶浸液的混合制团工艺。对于金矿石而言,制团用的粘结剂为石灰和水泥(约各为 0.5%),溶浸液为含氰溶液(约 20%)。各不同物质之间的实际比例应由试验确定。

制团设备多种多样,常见的有:圆筒制团机;圆盘制团机;筑堆制团;带式输送机制团以及逆向带式制团机。

(1) 圆筒制团机

由转筒、传动装置、溶浸液或水的喷射管、石灰或水泥给入装置等组成(图 3-17)。

圆筒转速设计可调,通常为临界速度的 20%~60%;转筒长与直径比为 5:2.5;圆筒倾角为 $1^{\circ}\sim 4^{\circ}$ 。

物料在圆筒内滞留的时间为 1~4 min,通过调整转筒转速与倾角来加以保证。

(2) 圆盘制团机

如图 3-18 所示,由钢板制成的圆盘、垂直盘底的中心轴、安在盘面上的刮板及加水装置等组成。

圆盘坡度一般与水平面成 $40^{\circ}\sim 65^{\circ}$;转速为 30~50 rad/min,盘深为 0.46~0.91 m。

一台直径为 6.1 m 的圆盘制团机每小时可处理 90 t 矿石。



图 3-16 国内某金矿堆浸场

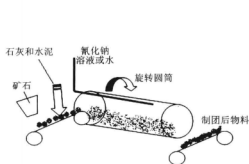


图 3-17 圆筒制团机示意图

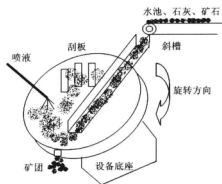


图 3-18 圆盘制团机示意图

(3) 筑堆制团

筑堆制团工艺较简单,适合处理较细的物料(图 3-19)。

与破碎设备相连的传送带的排料端离地面高度为 4.6~6.1 m,被喷淋液湿润的矿石在下

落的过程中受到一个或多个搅拌棒的阻挡作用。这样,既能让下落中心相对干燥的物料更好地与下落周边相对湿润的物料充分混合,也能有效地阻止粗细不同的物料在下落过程中产生明显的离析现象。

作为解决粗细颗粒离析问题的补充措施,可以利用前端式装载机将矿堆周边太粗的矿块装上卡车,送去重新筑堆,使矿石重新混合,以获得理想的效果。

(4) 带式输送机制团

借助若干条进行混料的传送带来实现矿石制团和筑堆工作,适于混合细粒物料。

基本原理是,将细粒矿石送到普通的传送带上,由于传送带的卸料端悬挂着很重的搅拌棒,并处于下落的矿石流中,借助于各传送带排料端与下一条传送带接料端之间近 2 m 的高差,在喷淋管道喷出的溶浸液的共同作用下,实现矿石制团与筑堆。

(5) 逆向带式制团机

在安装角度很大的传送带上给料,传送带在将矿石输送到顶端的过程中,矿石因为下滑力作用在传送带上逆向滚动成团。当然,应保证传送带上矿石的绝对运动速度与传送带运动速度一致。

3.3.2.3 布液方法

如何将溶浸液导入废石或矿石堆,使之与待浸物料充分、均匀接触并发生浸出反应,是地表堆浸工艺中的重要环节。常见的布液方法有三种:喷淋法、灌溉法和垂直管法(表 3-4)。

表 3-4 常见布液方法分类

布液方法	定义	优点	缺点	应用范围
喷淋法	利用多孔塑料管、金属或塑料喷头等设备,按一定的方式将溶浸液喷淋到浸堆表面的方法	溶浸液在浸堆上的分布均匀,经济效益好	干旱或高温地区,溶液的蒸发损失率偏高,甚至达 60%	可用于废石堆浸,更是矿石堆浸中的首选喷淋方法
灌溉法	在浸堆顶部挖掘沟、槽、渠或浅池,然后用灌溉法将溶浸液引入其中,当溶浸液达到一定深度时,就会不断向浸堆深部渗透,实现浸出作业	借助修筑在浸堆顶部的沟、槽、渠或浅池等工程,易于实现对整个浸堆的分区浸出、统筹安排、综合管理作业	沟、槽、渠或浅池的修筑会增加浸出作业的成本	渗透性能较好的废石堆,或矿石堆浸
垂直管法	在浸堆顶部按一定的网格距离布置一定数量的、孔径合适、孔深得当的布液孔(管)	适用性好	由于需要钻孔,是三种布液方法中成本最高的一种布液方法	能用于矿堆高度较大、浸堆渗透性不够理想的废石堆浸,或矿石堆浸

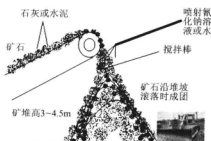


图 3-19 筑堆制团示意图

(1) 喷淋法

多孔塑料管是喷淋法中最常使用的设备,图3-20是喷淋法在具体矿山中的使用情况。喷淋法中的关键参数,是根据浸堆规模(高度、水平面积大小)以及溶浸液输送管道管径大小及管内液体压力等参数,按照尽可能将溶浸液高效、均匀地喷淋到整个矿堆顶部的原则,合理地确定管网间距及喷头位置参数。图3-21是美国某矿山含铜废石堆浸(废石堆面积 $7.7 \times 10^4 \text{ m}^2$,堆高67 m)时使用的喷淋系统示意图。

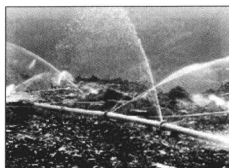


图3-20 喷淋法在具体矿山中的使用

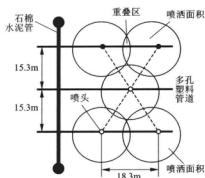


图3-21 美国某矿山含铜废石堆浸时使用的喷淋系统示意图

喷淋布液法之所以是矿石堆浸时首选布液方法,主要原因有两个方面:其一,构成矿石堆浸的物料与废石堆浸的物料在物理性质方面有很大的不同,比如,矿石堆的体积、高度以及矿石块度都比废石堆的要小得多,而且矿石堆浸时的物料分布比较均匀,渗透性良好;其二,则是因为在满足布液要求的前提下,喷淋法是工艺最简单,经济效益最好的。

喷淋系统分固定式和摆动式。固定式指喷淋支管采用多孔塑料管,借管中压力使溶液呈喷洒状自孔中喷出实现喷淋目的。喷孔的喷洒面积取决于管道中液体的压力。这种系统安装容易,保养简单,造价低。但容易形成液沟,导致溶浸液分布不均匀,进而影响浸出效果。摆动式是指通过喷淋支管上的喷淋器来实现喷淋目的。喷淋器的摆动或旋转能有效地防止液沟的形成,是将溶浸液均匀分布到矿堆的有力保证。其缺点是运动部件的保养成本相对较高。常见的喷淋器见表3-5。

表3-5 常见摆动式喷淋器

摆动式喷淋器类型	相关性能、参数
Rain-bird-脉冲旋转喷淋器	工作压力为0.14~0.28 MPa,有效半径10~15 m。旋转部件易磨损,养护工作量较大
Bagdad Wiggler-长230 mm、壁厚6.4 mm的橡胶软管制成	作业压力为0.14~0.28 MPa。一般将摆动式喷淋器放置在3 m高的中心拱架上,当溶液通过管道时,另一端摆动使喷出的溶液均匀分布到矿堆上。构件结构简单,保养方便
Senninger Wobbler-摇摆喷淋器	正常作业压力下,喷淋器将产生1.2 m高,半径为2.7 m的喷射液。液滴较粗大,有利于保持液体的热量。构件简单,易于保养

(2) 灌溉法

灌溉法中在浸堆顶部需修筑的沟、槽、渠或浅池一般由推土机或前端式装载机等设备完成。采用这种方法时,需将废石堆表面划定区域,分区灌溉。当所灌溉的区段的废石为溶浸液所饱和一定时间后,暂停灌溉;停歇一段时间后,再继续灌溉。反复循环,直至浸出富液的金属含量达到预定值时,该区停止灌溉,开始灌溉另一区段。当然,如果需要,也可在多个区段同时进行浸出作业,如果管理得当,还能有效实现对浸出富液中目标金属成分浓度的控制,使之在整个生产过程中保持相对稳定的值,简化金属提取流程,提高工作效率。

图3-22为某生产矿山采用灌溉法布液时,在浸堆顶部修筑的溶浸液浅池。

(3) 垂直管法

垂直管法在具体应用当中,关键参数有孔网间距、孔径及孔深等。实际生产中,使用的孔网间距没有统一标准,从 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 到 $15\text{ m} \times 17.5\text{ m}$ 不等。布液用的孔可以用钢绳冲击式穿孔机形成的直径为 150 mm 的钻孔,孔深约为浸堆高度的 $2/3$ 。钻孔形成后,加套管并将直径为 102 mm 的多孔塑料管径套管内部插入钻孔底部,取出套管。



图3-22 某矿山生产中使用的溶浸液浅池

3.3.2.4 浸出液收集

浸出液收集率的高低直接关系到浸出作业的技术和经济指标的好坏。

堆浸作业中,影响浸出液回收率的主要因素是:

①堆浸场地的防渗漏措施是否到位,包括浸垫建设、集液沟渠及储液池底的防渗漏处理;

②浸出液收集系统是否完善,浸场周边以及浸场与储液池之间是否有数量足够、设计合理、坡度适当的浸出液收集沟渠;

③浸出液储存池容量是否与设计浸出能力匹配,必要时可能需建设溢流池;

④浸出场地是否相对封闭,地表水及雨水径流等的疏导与防堵措施是否合理;

⑤其他因素,比如,采取必要措施尽可能降低喷淋过程和浸出过程中溶浸液的损耗。

3.3.2.5 地表原地浅井浸出

该方法适用于某些易浸出的表生矿床(如离子型稀土矿)。这类矿床矿体埋深较浅,地表浅井可以直接深入到矿体中,溶浸液则可以从地表浅井注入到矿体,并浸出矿物中的有用成分。地表原地浅井浸出法能有效地避免矿区因露天开采剥离所造成的环境破坏及尾矿堆弃带来的环境污染,而且能提高资源利用率,提高生产效率,改善劳动条件和降低生产成本。

稀土是包括镧、铈、钇、钆、铽、镱、铈、钆、铽、镱、铈、钆、铽、镱等17种元素的典型金属。稀土矿则是含有稀土元素的矿床。

稀土的主要用途是能加入钢中,可使钢结构均匀,“筋强力壮”;稀土加入铸铁中,可“使铁成钢”。此外,性质活泼的稀土金属在机械、石油化工、彩色电视、电子、原子能、宇航、玻璃、陶瓷、轻工业、医疗器械以及农业等部门,也有着极其广泛的用途。它们可给石油化工工业作催化剂,给玻璃陶瓷工业作抛光材料、脱色剂、有色剂,给无线电电子工业作激光

材料、荧光材料和永磁材料,给原子能工业作控制材料、结构材料和核燃料,医学上用于诊断器、探伤器、X光透视仪器,农业上作农作物的微量元素肥料和农药等。世界上最轻的稀土金属锂,它的比重只有木头的1/2,而且熔点低、沸点高,导热性和热容量都很大,是氢弹、火箭、核潜艇和新型喷气飞机的重要燃料。这些具有奇异功能,被人们称为“金属新贵”的稀土金属,随着现代科学技术的不断发展,其用途还会越来越大。

离子型稀土矿床具有很高的经济和战略价值。离子型稀土矿一般赋存于花岗岩等火成岩的风化壳中。矿体呈层状分布于被风化、剥蚀、冲刷而形成的准丘陵地带中(图3-23)。

离子吸附型稀土矿的矿床水文地质条件较简单。残坡积孔裂隙含水层与风化矿层孔裂隙含水层构成统一的含水层,

下部花岗岩基岩为隔水体。地下水来源为大气降雨。风化壳矿石疏松、粒度较小且均匀。空隙度为25%左右,渗透系数为0.5~2.0 m/d不等。离子型稀土矿的富集应与地下水运移规律密切相关,一般应富集于当地地下水位变动带中,即风化层的中、下部。

稀土矿物之所以能用溶浸法开采,是因为离子型稀土当遇到化学性质更为活泼的阳离子时,能被解吸下来进入溶液。工业上一般用价格较便宜,浸出效果好的硫酸铵、氯化铵为浸出剂。

地表原地浅井浸出法可分为明沟集液的浅井浸出法与暗沟网集液的浅井注液法。

①明沟集液的浅井浸出法(图3-24)。

集液明沟截面为梯形,沟底宽度不小于40 cm,设置在山脚沟谷部位,紧挨矿体一侧。沟的深度应挖至花岗岩基岩,或至少挖至原矿体饱和水位以下20~30 cm。集液沟下游再设置集液池,浸出液能依靠自流入集液池。

注液井网度一般为(5~7) m×(4~6) m,呈梅花形布置。深度一般应保证穿过表土层后1.5~4 m。山顶、山脊井深7~10 m,山坡井深5~7 m,山脚井深3~5 m。注液井一般为直径0.6 m的圆井,或0.6 m×0.7 m的方井。挖好的井应进行简易支护:就地取材,割茅草填入井内并压实;或放入编好的一节的竹笼。

每个采场应有5~7个观测井,分布在山顶和山腰部位。生产探矿时的探矿井一般被用作观测井。

溶浸液由高位池的主输液管,自流进入采场分支管道,由分支管道自流入设置在注液井上方的注液管。

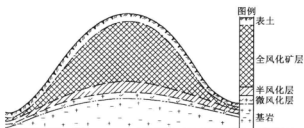


图3-23 离子型稀土矿剖面图

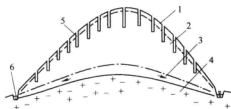


图3-24 明沟集液的浅井浸出法示意图

1—表土层; 2—全风化矿层; 3—半风化矿层;
4—花岗岩基岩; 5—注液井; 6—集液阴沟

在采场山坡最低一排注液井外侧,开挖排水、排洪沟,以满足暴雨时全采场的排水、排洪要求。

明沟集液的原地浅井浸出法适合于花岗岩基岩能在山脚初露的大多数稀土矿床。该方法山地工程量少,采场准备时间短、浸出易于观察与管理,生产成本低。

②暗沟网集液的浅井注液法(图3-25)。

该方法采场上部设计、布置原则与明沟方法大体相同。所不同的是该方法的集液沟为暗沟。

沟的开挖原则是在能见到渗出地下水的最低处以低于原水位20~30 cm的水平作为集液沟底,按矿层原有地下水力坡度向矿体内开挖高1.6 m,腰宽0.6 m左右的梯形暗沟。

暗沟成网状分布在溶浸采场的底部。暗沟之间的距离一般为8~10 m。

暗沟挖成后应进行支护,以防止溶浸时发生坍塌。

该方法适合矿区风化程度深,风化层厚且稀土主要富集在风化层的中上部,其深部含矿较低或不含矿的基岩底板深潜的稀土矿区。暗沟的开挖能将母液收集率提高至95%以上。

稀土浸出作业时,浸出剂多选硫酸铵或氯化铵,可单独使用或混合使用。溶浸液浓度一般可分三阶段配制(表3-6)。

表3-6 溶浸液浓度配制参数

采场平均品位/%	>1.2			0.8~1.2			<0.8		
注液阶段	1	2	3	1	2	3	1	2	3
溶浸液浓度/(g/L)	30	25	15	25	20	10	20	15	10
占注液量总量/%	30	30	40	30	30	40	30	30	40

按溶浸液体积与未松动原矿体积之比计算的液固比,一般取0.4~0.5。品位高的取大值,品位低的取小值。

在溶浸液注完后,加注顶水。顶水水固比一般取0.7~1.0。采场浸出液无回收经济价值时,停止注入顶水。

浸出作业过程中,应遵循先浓后淡、先上后下、先液后水的原则。

顶水期时间约为注水期的三倍(4~6月)。由于全矿层基本处于水饱和状态,应特别防止山体滑坡,因此,注水的方式应有所讲究,比如,在全山顶水5~7天后,逐步从山脚往山腰逐排停注顶水,每排停注时间间隔5~7天,最后只剩山头、山脊部位3~5排井加注顶水。

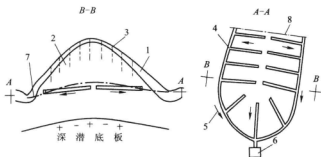


图3-25 暗沟网集液的浅井注液法示意图

1—表土层;2—全风化矿层;3—注液浅井;4—暗集液沟网;
5—浸出液流向;6—集液池;7—矿层原地下水;8—采场边界

为了防止浸出液的外渗损失,在浸出液可能流向采场集液沟、池外渗地段,设置注水浅井或拦水沟,使井(沟)中水位与集液沟、池中的液位相等或略高于液位,在水、液界面上产生一个等压静止界面,起到有效地防止浸出液外渗的作用。

浸出稀土母液的工业利用浓度为 0.3 g/L 左右。母液用泵输送至水冶车间,先进行净化除杂:在母液中加入碳酸铵等弱碱性化合物,提高 pH,使母液中大部分杂质 Al^{3+} 呈 $\text{Al}_2(\text{OH})_3$ 沉淀。

除杂后的母液澄清后排入沉淀池,以草酸或碳酸铵作沉淀剂沉淀稀土。沉淀后的稀土经过滤干燥后进行灼烧,最后以混合稀土氧化物出售。沉淀稀土后的上清液,经回收处理后可补加浸矿剂返回采场浸矿,也可直接返回采场作为顶水注入采场。

3.3.3 原地浸出法工艺

3.3.3.1 概述

原地浸出法是指用溶液液从天然埋藏条件状态下的非均质矿石(根据情况矿石可能不需任何处理,也可能要求进行预先破碎处理)中,有选择性地浸出有用成分的采矿方法。

原地浸出法的基本构成要素(图 3-26)如下:

①地面工程:生产场地的准备(民房拆迁、平场)与生产服务设施建设(办公场所、生产指挥中心、供电所及道路交通等)。

②注液钻孔工程:按设计计算出的注液孔参数(包括孔径、孔深和孔间距)完成注液孔工程系统建设。

③集液钻孔工程:根据设计计算参数完成集液孔网的建设。很多情况下,注液孔也可能同时被设计兼作集液孔用。部分情况下,还可能要求完成必要的集液巷道。

④预处理工程:根据被浸对象的赋存条件及矿石、围岩的物理力学性质,为提高浸出作业效率可能要求对矿石进行预先松动破碎处理。

⑤制备工厂、空气压缩机房、储存池、泵及溶液加工处理工厂等。

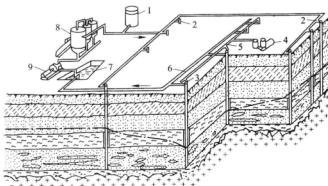


图 3-26 原地浸出法采矿基本构成要素

1—溶液制备处；2—注液孔；3—抽液孔；4—空气压缩机；5—气升泵的气管；
6—富液汇集管；7—沉淀池；8—溶液加工处理装置；9—泵

与常规采—选—冶的资源开发利用方法相比较，地浸法的主要优点有：

①由于剥离工程量及井巷工程量可减少到最低限度，采、装、运设备和设施省，所以基建投资少、建设周期短、生产成本低。

②地面工程量及规模的控制能有效地降低对植被的破坏，从而保护生产矿区的生态环境。

③绝大多数工作是在地面上完成，因而回避了地下采矿工作环境条件差、危险性高的实际情况，为工人创造了舒适、安全、环保的工作环境。

④能降低对矿体含矿量方面的要求，并能实现对难采、难选矿体的回收，有利于扩大对贫矿资源的开发，提高矿产资源的整体利用率。

用化学的方法将对地下固态物质的开采转化为对液态物质的回收，能大大简化施工工艺。液态物质在输送方面的便利性和优越的可自动控制性，使整个地浸法工艺更容易借助现代工业生产技术实现自动化生产。

地浸法的主要缺点则有以下几点：

①条件苛刻，尤其是对矿体的赋存条件、顶底板力学性质及渗透性情况、矿石及围岩的物理化学性质、开采范围内的水分地质条件等都有严格的要求。

②矿体的整体浸出率，与矿体本身的矿化程度、矿体范围内渗透性的均匀度、伴生矿物(杂质)情况等有密切联系。当各种因素都不利于浸出率的提高时，会严重影响资源的总回收率。

③当溶浸剂为有害有毒的含氰化合物时，不容易完全避免地下水系的污染，而被污染的地下水系的复原也具有一定的操作难度。

3.3.3.2 方法特点及其对待浸矿产的要求

地浸法是在不将矿石从地下采出地表的条件下完成矿石中有用成分的回收利用，大部分工作都在地面进行。正因为如此，必须通过调研和试验的方法尽可能详尽地了解待浸矿体与浸出相关的各种资料和信息，确保地浸法能使地下矿产资源中的有用成分得到充分浸出、回收和利用。

矿体不经预处理的地浸法在具体实施之前，一般要求先进行下述两项工作：

①矿床原地浸出(矿体不经预先松动处理)条件评价；

②矿床原地浸出条件试验。

矿床原地浸出条件评价的主要内容如表3-7所示。

表3-7 矿床原地浸出条件评价的内容

矿床原地浸出条件	评价内容
矿床地质条件	<p>适于原地浸出的矿床，基本上为沉积、淋积且具有一定孔隙度的层状矿体。具体评价内容为：</p> <p>①顶底板岩层是否不透水</p> <p>②与固孔材料相适应的矿层埋藏深度是否恰当</p> <p>③有无有利的金属富集条件</p> <p>④矿岩物质成分是否对浸出有利</p> <p>⑤能不能考虑综合回收多种金属</p> <p>⑥是否有利于环境保护</p>

续表 3-7

矿床原地浸出条件	评价内容
水文地质条件	水文地质构造、含水层情况、地下水流向与流速、岩石的渗透性、含水层的涌水量及其水力联系、隔水层的分布等直接关系到原地浸出工艺的可行与否。基本评价内容为： ①矿层含水情况怎样。泄水矿床一般不宜用原地浸出法开采 ②渗透系数是否在合理范围(1~10 m/每昼夜为好) ③矿层中的水压是否适当。一定的压力有利于浸出富液的抽取，但过高，会加大溶浸液在矿层中的流速，影响浸出效果 ④矿岩中有无黏土夹层，厚度情况(<100 mm 为宜)
物理化学条件	溶浸是借化学溶剂对矿物有选择性的化学作用来进行的，矿层物质的物理化学性质直接关系到原地浸出的成败。基本评价内容为： ①浸出过程中，溶解度(被溶浸矿物表面积与矿物总面积之比值)是否向增大的方向变化 ②能否对浸出过程中可能出现的堵塞现象(气体堵塞、化学堵塞、机械堵塞和离子交换堵塞)有效地加以控制和消除

在针对上表中列出的各项原地浸出条件进行全面调研、分析综合后，如果认为矿体应该可以用原地浸出法来开采，那么，为了确保浸出作业的顺利进行，接下来就必须借助更具体的矿体原地浸出条件试验进行原地浸出条件确认。三种不同的浸出条件试验及每种试验要获得的主要参数参见表 3-8。

表 3-8 矿体原地浸出条件试验步骤和内容

试验步骤	基本内容
1. 矿床地质和水文地质条件试验	为了获得能满足进行原地浸出法的条件评价、可行性研究及生产设计要求的相关资料，必须对矿床地质勘探成果报告进行完善和补充。这些资料包括： ①矿层中矿石及夹石的渗透系数，有效孔隙度 ②矿层及其顶底板岩层的渗透系数 ③矿层地下水位及水压，地下水的化学成分、矿化度和水温 ④矿层和矿体厚度 ⑤矿石品位 ⑥矿体埋藏深度 ⑦矿石中有用成分的存在形式与赋存状态 ⑧矿层中矿石、夹石和顶底板岩石的物质成分、化学成分和粒度组成 ⑨矿体大小、形状和产状，矿石储量 ⑩与钻孔有关的岩石物理力学性质
2. 矿样浸出参数测试	试验在试验室完成，要获取的参数如下： ①矿样渗透系数 ②确定试验用的溶浸液配方和使用方法 ③有用成分的浸出率-时间变化曲线 ④溶液渗透量及浸出液的各种杂质的变化规律 ⑤完成矿样试验所需的时间 ⑥清洗被浸矿样所需的时间和淋洗水量 ⑦浸出液中，有用成分含量与溶液配方和使用方法之间的关系

试验步骤	基本内容
3. 矿层原地浸出参数测试	试验在现场完成,要获取的参数如下: ①钻孔注液和抽液能力 ②注液压力,抽液钻孔及观察钻孔内的液位变化 ③溶浸液在矿层中的渗透速度 ④确定生产用的溶浸液配方和使用方法 ⑤抽出液中有用成分和杂质含量与时间的变化规律 ⑥抽出液中有用成分的平均含量 ⑦抽出液中的剩余酸(碱)度和氧化还原电位 ⑧抽出液的固体悬浮物含量 ⑨液固比 ⑩抽出单位富液的酸(碱或其他溶剂)和氧化剂的总消耗量 ⑪矿层酸(碱或其他溶剂)和氧化剂的总消耗量 ⑫吸附材料的吸附效果、淋洗剂用量和效果、沉淀剂用量和效果 ⑬资源抽出率和回收率 ⑭结束一个矿块浸出作业所需的时间 ⑮回收单位产品的电能消耗量 ⑯产品经济成本分析

矿床地质和水文地质条件补充勘探网度与矿体种类、矿体规模、矿体心态和矿化均匀程度等条件有关。有代表性地段的全钻孔岩芯采取率应不小于 80%;对 50% 补充勘探钻孔只要求采取矿层及顶底板的矿芯和岩芯,采取率不小于 80%;其余钻孔可不采芯,但应保证伽马测井、自然电位测井和视电阻率测井等工作。

表 3-9 是针对铀矿来说,补充勘探网度与矿体规模之间的关系。

表 3-9 矿体规模(铀矿)及其补充勘探网度

铀矿规模	补充勘探网度
大型矿床	(400 ~ 200) m × (100 ~ 50) m
中型矿床	(200 ~ 100) m × (50 ~ 25) m
小型矿床	(100 ~ 50) m × (50 ~ 25) m

为了揭露矿层及其顶底板岩层,验证钻探结果,在个别有代表性的矿段,应布置 1~2 个探井或少量的勘探巷道,揭露矿层及其顶底板岩层,验证钻探结果。

为了为下一步的矿样浸出试验做好准备,在探井或巷道中,要按岩性分别采取数个结构未受破坏的长方体(如长宽高:300 mm × 200 mm × 400 mm)或圆柱体(如直径 $\phi 200 \sim \phi 300$ mm,高 300 ~ 400 mm)矿石和岩石样品,以及数百公斤矿石散样。

在进行矿床地质和水文地质条件补充勘探时,钻孔应进行周密设计,既能起到勘探作用,又能为试验和生产所用,节省费用,缩短基建周期。具体地说,应注意:

- ①初期的补充勘探钻孔应与原地浸出试验钻孔相结合;
- ②大部分补充勘探钻孔与原地浸出生产钻孔相结合;
- ③尽可能使补充勘探钻孔和试验、生产钻孔的结构相同。

矿样试验的基本原理是使溶液通过矿样,测试溶液流量并分析浸出液的化学成分。首先,用水作为测定矿样渗透系数的溶液。其次,用根据矿样烧杯试验结果配置的溶浸液来测试矿石可浸性方面的数据。包括:

①有用成分浸出率 ε

$$\varepsilon = \frac{\sum C \cdot \Delta V}{\alpha \cdot P} = \frac{\alpha - \alpha'}{\alpha}$$

②浸出液中有用成分平均含量 C_p

$$C_p = \frac{\sum C \cdot \Delta V}{\Delta V}$$

③液固比 f

$$f = \frac{\sum \Delta V}{P}$$

④浸出单位重量有用成分的酸(碱)消耗量 q

$$q = \frac{\sum C_0 \cdot \Delta V - \sum C_p \cdot \Delta V}{\sum C \cdot \Delta V}$$

⑤矿石酸(碱)消耗量 R

$$R = \frac{\sum C_0 \cdot \Delta V - \sum C_p \cdot \Delta V}{P}$$

式中: C ——浸出液中有用成分含量;

ΔV ——浸出液量;

α ——矿石品位;

P ——矿石量;

α' ——矿石尾渣品位;

C_0 ——溶浸液浓度;

C_p ——浸出液剩余酸(碱)度。

常用的矿样试验装置包括矿石散样试验装置和结构未受破坏的矿样试验装置(图3-27,图3-28,图3-29,图3-30)。

矿样浸出试验结束后,便可根据获得的结果对矿石可浸性等条件进行评价。表3-10给出的是评价铀矿石可浸性的通用性评价指标。

表3-10 铀矿石可浸性的通用性评价指标

指标	单位	可浸性评价	
		有利	不利
有用成分浸出率	%	> 50 ~ 70	< 40 ~ 50
浸出液中有用成分的平均含量	mg/L	> 50	< 20
液固比	< 5	> 10 ~ 15	
矿石酸(碱)消耗量	%	< 3 ~ 5	> 10

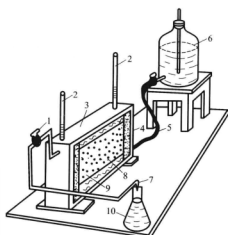


图 3-27 矿石散样试验装置(一)

- 1—调节阀; 2—液位管; 3—有机玻璃箱; 4—细砾石;
5—软管; 6—盛液瓶; 7—导液管; 8—矿石散样;
9—不透水填料; 10—集液瓶

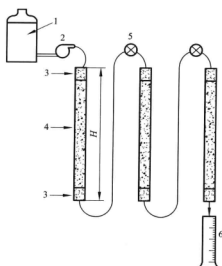


图 3-28 矿石散样试验装置(二)

- 1—盛液瓶; 2、5—调节阀; 3—细砾石;
4—矿石散样; 6—集液瓶

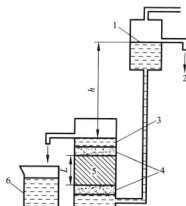


图 3-29 结构未受破坏的矿样试验装置(一)

- 1—液位; 2—溢液管; 3—液层; 4—细砾石;
5—结构未受破坏的矿样; 6—盛液瓶

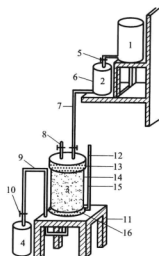


图 3-30 结构未受破坏的矿样试验装置(二)

- 1—供液瓶; 2—液位瓶; 3—结构未受破坏的矿样;
4—集液瓶; 5、10—调节阀; 6—稳定液面; 7—注液管;
8—排气管; 9—出液管; 11—支架; 12—稳定液位;
13—上盖; 14—环氧树脂层; 15—液位管; 16—下盖

矿层原地浸出试验是在现场完成, 每组试验由若干个抽、注液钻孔及观察孔组成。图 3-31 是由一个抽液钻孔、一个注液钻孔和两个观察钻孔组成的试验系统。

钻孔布置形式可以多种多样, 常见的一些矿层原地浸出试验系统中的钻孔布置形式如图 3-32 所示。

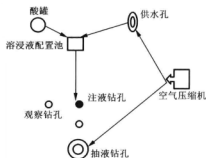


图 3-31 矿层原地浸出试验系统

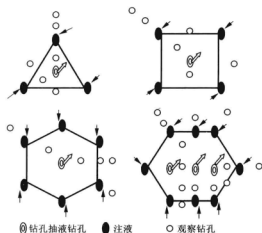


图 3-32 矿层原地浸出试验不同的钻孔布置形式

矿层原地浸出试验相关参数的计算方法如下:

①有用成分抽出率 ε

$$\varepsilon = \frac{P_0}{\gamma m_c F}$$

②抽出液中有用成分平均含量 C_{cp}

$$C_{cp} = \frac{\sum C_m Q_0}{\sum Q_0}$$

③液固比 f

$$f = \frac{\sum Q_H}{\gamma FM}$$

④抽出单位重量有用成分的酸(碱)消耗量 q

$$q = \frac{\sum C_0 Q_H - \sum C_p Q_0}{\sum C_m Q_0}$$

⑤矿层酸(碱)消耗量 R

$$R = \frac{\sum C_0 Q_H - \sum C_p Q_0}{\gamma FM} \times 100\%$$

⑥浸出所需时间 T

$$T = \frac{\gamma FM f}{\sum Q_0}$$

⑦清洗矿层所需时间 T_H

$$T_{\text{H}} = \frac{L_0 \left(1 + \frac{C_0 n}{10 R \gamma} \right)}{U}$$

式中: P_0 ——有用成分抽出量;

γ ——矿岩容重;

m_c ——平均米百分比;

F ——被浸面积;

C_m ——抽出液的有用成分浓度;

Q_0 ——抽出液量;

Q_{H} ——注入矿层溶浸液量;

C_0 ——溶浸液浓度;

L_0 ——矿块长度;

R ——矿层酸(碱)消耗量;

U ——地下水实际流动速度;

M ——矿体厚度;

n ——矿石有效空隙度;

C_p ——浸出液剩余酸(碱)度。

要求先对矿体进行破碎松动的地浸法,其工艺技术与不对矿体进行松动破碎处理的地浸法有很多相似、甚至相同的地方。最大的区别在于增加了对浸矿体进行预先松动破碎处理这一环节。

为了确保预先松动破碎的可行性和效果,对矿体提出了以下几方面的要求:

①矿石是易碎的;

②矿石是有效空隙度(包括由于爆破产生的有效空隙度)大于2%的厚矿体、团状矿体、急倾斜矿体;

③矿石中的有效成分适于浸出,其他物质成分不妨碍浸出;

④消耗的溶浸剂不多,且易于获得破碎矿石所需的补偿空间。

可用于预先松动破碎的方法大概有以下几种:

①常规的凿岩爆破;

②钻孔爆破;

③药室爆破;

④水力压裂;

⑤核爆破。

为了保证获得较理想的地浸效果,最理想的矿石块度分布范围为25~50 mm。一般情况下,要求经松动破碎处理后的矿石块度分布大致符合表3-11的要求。

表3-11 破碎后理想的矿石块度分布范围

矿石块度	< 50 mm	100 ~ 230 mm	> 230 mm
百分比	50% ~ 60%	< 20%	无

3.3.3.3 布液与回收

地浸法中的布液方式一般采用布置注液钻孔的方式将溶浸液导入矿层(图3-33)。

浸出富液的回收则利用集液巷道(多为原有的地下坑道)将富液汇集到水仓,利用泵扬经抽液钻孔送至地表(图3-34)。无坑道可用时,则用大口径钻孔来集液。

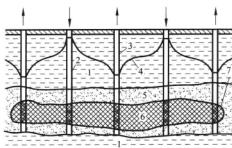


图 3-33 地浸法中溶浸液的注入

1—隔水层；2—注液钻孔；3—抽液钻孔；4—液压线；
5—含水层；6—矿体；7—过滤管

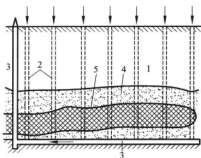


图 3-34 地浸法中用坑道和抽液钻孔回收浸出富液

1—隔水层；2—注液钻孔；3—集液巷道、抽液钻孔；
4—含水层；5—矿体

如何确定注液孔和抽液孔之间的理想距离是一个比较复杂的问题,原则上可通过被浸面积 F 来进行计算,要求在抽注液井数量、浸出效果和经济效益之间寻找到一个最优组合。

对于一个抽液钻孔和一个注液钻孔组成的浸出系统而言,如果抽液量 Q_0 和注液量 Q_H 均为恒定值,则被浸面积 F 也是恒定值,计算式如下:

$$F = \pi b^2 \frac{a^2(a^2 - 1) - 2a^3 \ln a}{(a - 1)^5}$$

式中: b ——抽注液钻孔间距,一般取 10~15 m;

$a = Q_0/Q_H$ 为抽注液量非平衡系数,通常为 4~7。

图 3-35 为不同抽注液量非平衡系数下的被浸面积。

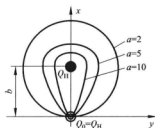


图 3-35 不同抽注液量非平衡系数 a 条件下的被浸面积

3.3.3.4 地浸法工艺与技术

简单地说,地浸法生产包括三大工序:浸出作业(含可能的预先松动破碎、钻孔、布液、浸出、集液、扬升)、富液加工处理(水冶)和辅助作业。

具体地说,浸出系统的工程设施包括:注液和抽液工程;溶浸液配置设施;注液和抽液设备;输送管道;各种用途的储存池;自动控制室等。

水冶车间设施视矿种、溶浸液和富液的类型而定。比如处理含铀富液常见的水冶设施为:富液池、离子交换树脂吸附塔和淋洗塔、酸碱和其他原料储槽、淋洗液配制和储存槽、沉淀池、压滤干燥设备、化验分析室、产品仓库、三废处理设施等。

辅助作业设施包括:运输道路、车辆和车库、供电和供水系统、加工修理间、各种材料设备库、工作人员办公、生活设施等。

地浸法的生产工艺流程虽然与待浸矿体的种类、地质赋存条件、水文条件、矿岩物理化学性质等密切相关,但基本构成元素大同小异,而且比较简单(图3-36)。

其中,钻孔工程、溶液配制和使用以及溶浸范围控制是地浸法中的关键性环节。

(1) 钻孔工程

地浸钻孔不仅起着开拓、采准和采矿通道的作用,也担负着圈定采取、控制溶浸液运动以及监控浸出富液数量和质量等工作的部分任务。对地浸钻孔提出的基本要求为:

- ①能承受一定的压力;
- ②有较大的抽注液能力;
- ③能根据需要向不同品位或不同渗透

性能的矿段分配不同数量的溶浸液量;

- ④能长期保持稳定的生产力。

钻孔工程技术的主要内容则包括两方面的内容:

- ①钻孔结构和施工技术;
- ②钻孔间距及布置形式。

钻孔结构指孔深、孔径、过滤器类型及钻进过程中钻头的换径次数等。

设计钻孔结构时应考虑的主要影响因素有:

- ①矿床地质条件和水文地质条件(如岩石物理机械性质、矿层埋深、含水层位置等);
- ②抽、注液孔的抽、注量;
- ③产品液的提升装置和结构;
- ④套管材料(要求有良好的抗化学腐蚀性能);
- ⑤在浸析过程中能进行必要的地球物理和水文地质观测;
- ⑥在矿层的上部特别是开采位于含水层中的薄矿层上部能够形成牢固的隔水层;
- ⑦在钻进过程中,矿层底部的隔水层不应遭破坏,若被打穿必须采取止水措施;
- ⑧为防止溶浸液从地表渗透到套管与孔壁之间,应采用特殊的孔口装置;
- ⑨孔的寿命较采矿期要长。

孔深取决于矿层的埋藏深度,并直接影响钻孔开孔直径、钻头换径次数和套管材料的选择。

套管材料选择与孔深的关系见表3-12。

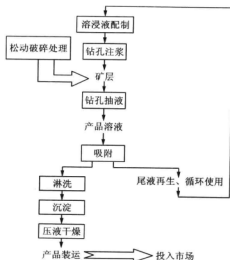


图3-36 地浸法生产工艺流程基本构成

表 3-12 钻孔孔深及其套管材料选择原则

钻孔孔深	<200 m 浅孔	200~400 m 中深孔	>400 m 深孔
套管(过滤管)材料	聚氯乙烯塑料硬管	不锈钢管或衬有钢丝的塑料管	不锈钢管

钻孔孔径与孔深也有密切关系(表 3-13)。

表 3-13 钻孔孔深与孔径关系

钻孔深度	确定孔径的一半原则	开孔孔径	终孔孔径
小于 100 m 的浅孔	设计大直径钻孔	400 mm	200~300 mm
深度较大的钻孔	采用小直径钻进	下入孔内套管: 100~150 mm	矿体部位扩大至: 400 mm

钻孔结构按钻头换径次数分为:

钻孔直径不变型,见图 3-37(a);

用大一级直径的钻头钻井至距矿层 2~5 m 处,下套管和注水泥浆,然后用小一级直径的钻头钻穿矿层,见图 3-37(b);

用小径钻头钻至设计深度,再用大径钻头从地表扩孔直到穿过矿层,见图 3-37(c)。

按其用途所完成功能的内容及数量,用于开采固体矿产的钻孔分为两大类,即开采钻孔(又称生产钻孔)和辅助钻孔。开采钻孔用于直接实现开采过程

向注液孔孔底输送溶浸剂,并将形成的矿浆或产品液由抽液孔提升至地表。辅助钻孔包括勘探孔、观测孔、监视孔、阻拦孔等。

钻孔因其用途不同,在结构、钻进技术及工艺、装备方面有实质性的区别。

为了使溶浸液顺利地注入矿层,并使含矿溶液顺利地抽到地面,在含矿孔段需安装过滤器。

过滤器应具有:

- ①最大的过滤面积,以减小工作液流的过流阻力;
- ②足够大的机械强度,能满足安装井管时的负荷和抵抗地层的压力;
- ③良好的滤液阻砂能力;
- ④高的抗化学腐蚀性性能;
- ⑤安装方便,成本低,取材易。

过滤器可以由不锈钢、PVC 硬塑料等材料制成,常用的过滤器类型有以下几种:

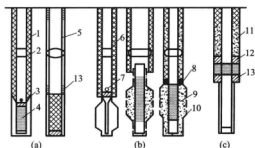


图 3-37 部分钻孔结构示意图

- 1—孔壁; 2—导向器; 3—封隔器; 4—过滤器; 5—塑料管;
6—水泥; 7—排水泥浆孔; 8—隔塞; 9—砾石;
10—扩孔; 11—黏土; 12—黏土球; 13—海带

①骨架式过滤器。

是一节有孔隙的管子。孔隙可以用钻凿、模压、焊割、铣削等方法形成的圆孔或直缝，能作为进水通道。

②缠丝过滤器。

在圆孔过滤器或筋条过滤器上缠金属丝制成。采用 6 mm 的垫筋，间距 40 ~ 50 mm；缠丝（尼龙丝或玻璃纤维丝）断面为梯形，丝距 1.0 mm。

③包网过滤器。

在圆孔过滤器或直缝过滤器的外壁缠丝或沿母线焊垫条，然后覆盖过滤网。

过滤器的长度：当含矿层较薄或抽注液量要求较大时，其长度与含矿层的厚度相等；当含矿层的厚度较大时（> 10 m），其长度可参考如下公式确定：

$$L = Q\alpha/D$$

式中：L 为过滤器有效长度，m；Q 为设计抽注液量，m³/d；α 为经验系数，细砂取 90，中砂取 60，粗砂取 50；D 为过滤器的外径，mm。

过滤器的滤水孔和孔隙率：取决于含矿层颗粒的有效粒度，若过滤器外面填砾时，滤水孔最少应能保留住 95% 的砾料。缠丝过滤器孔隙率为 5% ~ 10%。过滤器的直径可由下式确定：

$$D = AQ/(\pi Lmv)$$

式中：m 为孔隙率；v 为最大允许进液速度，m/s，其中 $v = 65K$ （K 为含矿层渗透系数）；A 为常数，其值为 8.64×10 ；其余同上。

钻孔间距和布置形式，与矿体的埋藏深度、形态和渗透性等条件有关。

工艺孔的布孔方式决定着溶浸液的有效循环、有效控制和回收效率。在进行初步试验之后，按最佳水文资料和经济因素布置孔网。

常用的布孔方式有四点型、五点型和七点型。如图 3-38 所示，五点型为方型，抽注液孔间距为 15 ~ 25 m。根据矿体形状和地下水的特性，采用多个四点型、多个五点型或多个七点型。渗透性较好的大矿体，钻孔常呈行列式排布；小矿体或渗透性较差的矿体，钻孔常呈网格式排列分布。

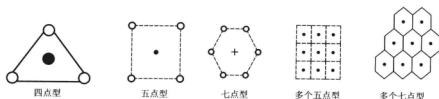


图 3-38 地质工艺孔原地浸出采矿法抽注液孔布置图

实心圆点—注液孔；空心圆圈—抽液孔

(2) 溶液配制和使用

用于地浸法的溶浸剂，其配方和使用方法，与堆浸法和常规水冶厂有所不同，要求满足以下一些条件：

①保证矿石中的有用成分能较完全地进入溶浸液；

- ②有选择性地浸出;
- ③不会导致矿层堵塞而恶化其渗透性;
- ④对所用的材料和设备无严重的腐蚀性;
- ⑤价格便宜;
- ⑥符合环境保护的要求。

溶浸剂和氧化剂的选择主要取决于矿种、矿石物质成分和化学成分等。

地浸法中常用到的溶浸剂有:

- ① H_2SO_4 ;
- ② HNO_3 ;
- ③ HCl ;
- ④ Na_2CO_3 ;
- ⑤ NaHCO_3 ;
- ⑥ $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$;
- ⑦ NH_4HCO_3 ;
- ⑧ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$;
- ⑨ NaCN ;
- ⑩ KCN 及 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 等。

地浸法中常用到的氧化剂有:

- ①氧;
- ②高锰酸钾;
- ③含氮氧化物;
- ④三价铁盐;
- ⑤过氧化氢;
- ⑥氯酸盐等。

用氧作氧化剂时,有两种方法:

- ①把含氧剂压入矿层、排挤地下水,待矿石被氧化后再注入溶浸液;
- ②把液态氧气化后压入注液孔底部,使之溶解于溶液中,并达到氧化矿石所需的含氧

浓度。

用氧作氧化剂时,必须保持适当的注氧量和注液压力,因为如果注入量过少,不能满足氧化矿物的需要,但如果注入量超过一定压力下的溶解度,又会造成气体堵塞现象。

用三价铁盐作氧化剂时,其再生办法是:

- ①用氮的氧化物作催化剂,用氧来氧化 Fe^{2+} ;
- ②用酸性废液与 NO_2 和纯氧的混合物氧化 Fe^{2+} ;
- ③在存在 H_2SO_4 的条件下,用含氧气体(如空气)和氮的氧化物氧化 Fe^{2+} ;
- ④使用活性炭,借助氧来氧化 Fe^{2+} ;
- ⑤用软锰矿(化学成分为 MnO_2 , 晶体属四方晶系金红石型结构的氧化物矿物)或细菌使

Fe^{3+} 再生。

(3) 溶浸范围控制

抽注液钻孔工程布置的理想目标应使注入的溶浸液能够将控制范围内的所有矿石都能被

浸到,而不出现浸不到的“死角”。

显然,溶浸范围与钻孔分布、注液压力和抽液孔内的液位降深值等条件密切相关。当抽量大于注量时,可用地下水动力学理论来计算抽注液钻孔影响范围内任意点的液位降深值 S_M 。

在同一含矿含水层中有若干个抽注液钻孔同时工作时,在这些钻孔工作影响范围内任意点 M 处的液位降深值 S_M ,应等于各孔单独工作时,该点处所形成的液位降深值和上升值的代数和,即

$$S_M = \sum_{i=1}^n S_{i-M} - \sum_{i'=1}^m S_{i'-M}$$

任一孔单独抽液时,于 M 点形成的液位降深值可写成:

$$S_{i-M} = \frac{Q_i}{2\pi K_\phi H} \ln \frac{R_i}{r_{i-M}}$$

全部抽液孔同时工作时,于 M 点处形成的液位总降深值为:

$$\sum_{i=1}^n S_{i-M} = \frac{1}{2\pi K_\phi H} \sum_{i=1}^n \left(Q_i \ln \frac{R_i}{r_{i-M}} \right)$$

类似地可写出全部注液孔同时工作时,于 M 点处形成的液位总上升值为:

$$\sum_{i'=1}^m S_{i'-M} = \frac{1}{2\pi K_\phi H} \sum_{i'=1}^m \left(Q_{i'} \ln \frac{R_{i'}}{r_{i'-M}} \right)$$

因此,

$$S_M = \frac{1}{2\pi K_\phi H} \left[\sum_{i=1}^n \left(Q_i \ln \frac{R_i}{r_{i-M}} \right) - \sum_{i'=1}^m \left(Q_{i'} \ln \frac{R_{i'}}{r_{i'-M}} \right) \right]$$

式中: n, m ——抽液孔和注液孔的数量;

i, i' ——抽液孔和注液孔的编号;

Q_i, R_i ——任一抽液孔单独抽液时的抽液量和影响半径;

$Q_{i'}, R_{i'}$ ——任一注液孔单独注液时的注液量和影响半径;

K_ϕ ——矿层渗透系数;

H ——矿层厚度;

$r_{i-M}, r_{i'-M}$ ——各个抽液孔和注液孔到 M 点的距离。

根据上述公式计算所得的数据,结合观测孔测试的资料,即可绘制等液位线和等 pH 线图(图 3-39、图 3-40)。

原地浸出虽然对农田、山林的破坏减少到了最低程度,但浸出作业完成后,可能会在浸出作业影响范围内留下部分溶浸液的残余,如氰化物、酸等,并可能对地下水,甚至对地面产生污染。因此,溶浸结束后,一定要采取措施进行环境复原工作。酸浸结束后,可能需抽洗数月矿层水质才能复原。氰化物为溶浸剂时,浸出作业结束后,尚需加入洗涤剂进行清洗,直到水质符合卫生标准。部分含 NH_4^+ 离子的残余溶浸剂的清洗相当困难,可能给矿区造成不可逆的环境影响,需特别予以关注。

3.3.3.5 地下就地破碎浸出

利用爆破方法就地矿体中的矿石破碎到预定的合理块度,使之就地产生微细裂隙发育、块度均匀、级配合理、渗透性良好的矿堆,然后在矿堆上布洒溶浸液,有选择地浸出矿石中的有价金属,浸出的溶浸液收集后输送至地面并回收金属,浸后尾矿留在现场就地封存处

置。这样, 80% 的矿石留在就地浸矿, 20% 的矿石出露地表堆浸。

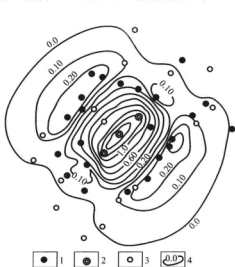


图 3-39 等液位线图

1—注液钻孔; 2—抽液钻孔;
3—观测孔; 4—液位降低或升高值



图 3-40 等 pH 线图

1—注液钻孔; 2—抽液钻孔;
3—观测孔; 4—等 pH 线

爆破后形成的块度直接影响浸出过程的速度及浸出效果。实际浸矿经验认为, 以 ≤ 150 mm 为就地破碎浸出的合格块度。

就地破碎的方法主要有常规炸药爆破破碎、核弹破碎和自然崩落破碎。近年来, 也有学者提出在高应力硬岩条件下, 利用动力扰动的方法实现诱导破岩的理论。其中, 常规炸药爆破破碎法使用最广。高分段或阶段深孔爆破与低分段的扇形中深孔爆破效果最好。为了达到合格块度要求, 推荐采用小补偿空间(补偿系数 1.15 ~ 1.25)的微差挤压爆破。

地下就地破碎浸出的另一个重要环节是选择合理的布液方法和系统。常用布液方法分为矿堆表面布液、矿堆内部预埋管网布液以及钻孔布液等。

(1) 矿堆表面布液

适用于急倾斜(倾角 $> 75^\circ$) 的矿体, 矿岩较稳固, 有表面布液的允许空间。常采用喷淋或滴淋布液方式。

(2) 矿堆内部预埋管网布液

采用浅眼爆破筑堆时, 采用分段或分层预埋管网对矿堆布液。具体做法是, 每采一个或几个分层, 待出矿后, 将事先准备好的多孔出流管用透水保护层包裹好预埋矿堆中。

(3) 钻孔布液

采用中深孔分段爆破或深孔阶段爆破筑堆时, 若矿体倾角小于 75° 或形态变化较大, 则必须采用钻孔布液或以钻孔对矿堆进行补充布液。具体的做法如图 3-41、图 3-42 和图 3-43 所示。

(4) 从布液巷道向矿堆钻孔布液

在矿堆上盘适当位置沿矿体走向施工布液巷道, 在布液巷道每隔一定距离施工一排扇形布液孔, 布液孔排距与孔底距应根据每个钻孔的浸出影响半径来设计。

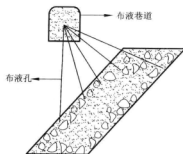


图 3-41 从布液巷道向矿堆钻孔布液示意图

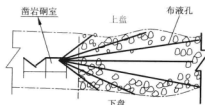


图 3-42 分段水平钻孔布液示意图

(5) 分段水平钻孔布液

沿垂高将矿堆分为若干分段，在脉外天井内靠矿堆一侧按分段高度施工凿岩硐室，从硐室向矿堆上盘钻水平孔对矿堆进行布液。

(6) 在矿堆顶部沿上盘钻孔布液

在矿岩稳固的情况下，沿矿体边界将矿堆顶底全部拉开，而后沿矿体走向每隔一定距离平行矿堆上盘施工布液孔，孔内安装多孔出液管对矿堆进行布液。此法适合于缓倾斜矿体的浸出。

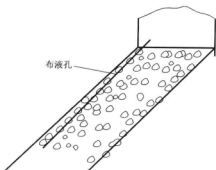


图 3-43 在矿堆顶部沿上盘钻孔布液示意图

地下就地破碎浸出主要适用于铜、铀矿山的浸出。

浸出过程的控制中涉及的主要参数有：溶浸液的浓度、试剂消耗、液固比、布液强度、溶浸液与浸出液的 pH、浸出周期和浸出率等。

浸出工艺取决于矿石种类、矿石浸出性能以及矿堆物理性质。浸出工艺的设计选用原则是以提高综合浸出效率为首要目标。

浸出液的收集直接影响浸出效果。为了更有效地完成集液工作，必须采取一定的防渗漏措施。对于地下就地破碎浸出而言，采场最有效的防渗漏措施是帷幕注浆技术；底部结构的防渗漏处理，一般是在爆破落矿前，在拉底空间内铺设混凝土假底，或整体铺设 300 mm 厚的黄土缓冲层，再垫 PVC 塑料软板作防渗层，其上再铺 0.3 ~ 0.5 m 的卵石或砾石作渗液层。人工假底应有 0.5% ~ 1.0% 的坡度。集液沟、池亦需要进行防渗漏处理，常用方法有：沥青防渗法、环氧树脂胶与玻璃纤维张贴防渗法、PVC 塑料软板贴壁防渗法等。

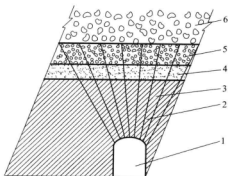


图 3-44 钻孔集液系统示意图

1—集液巷道；2—集液钻孔；3—下盘围岩；
4—混凝土假底；5—砾石渗液层；6—矿堆

地下就地破碎浸出作业中的集液方法有两种：巷道集液和钻孔集液(图3-44)。

集液的主要工作有：采场底部集液工程的施工与构筑，采场矿堆外围采准、切割等工程的封堵，集液沟、池的施工与构筑，集液中转系统的构筑与安装等。为确保浸出液的收集率，在布液前，应对被浸采场进行注水试验，并进行渗漏检测。

3.4.4 微生物浸矿

3.4.4.1 概述

溶浸采矿的基本原理是利用溶浸剂与待浸矿石之间能产生的化学反应，将矿石中的有用成分溶解浸出，并形成方便汇集和转运的可溶性物质，再经水冶等方法进行金属提取作业后即可获得目标金属，并生成最终产品。微生物(细菌)作为一种特殊的溶浸剂或浸出反应中的催化剂，对矿物的化学浸出有着重要的作用，并已经在铜矿和铀矿浸出作业中发挥着十分积极的作用。因此，微生物浸矿(亦称细菌浸矿或细菌冶金)主要是利用细菌的生物化学作用完成或帮助完成有用矿物的浸出。

与其他的化学溶浸采矿方法类似，细菌浸矿是用浸矿微生物的生物化学作用将矿石或精矿中有用组分转化为可溶化合物，并有选择性地浸出来，得到含金属的溶液，实现有用组分与杂质组分的分离，最终达到回收有用金属的目的。大量试验证明，细菌氧化与天然浸出或仅在空气和水中的化学氧化比较，其氧化速度快1000倍以上。

在国外，匈牙利人在16世纪便着手从矿坑水中回收铜。美国人在1888年实现从矿坑水中制取海绵铜，并于1947年在矿坑水中分离出化学自养细菌——氧化铁硫杆菌，同时，研究微生物在浸出矿石中的生物化学作用，使细菌浸出跨入了新的发展阶段，逐步完善了其工艺流程，成功地回收了不少的铜、铀、金和银。而细菌浸出铀矿石则最早被葡萄牙的“镭公司”应用。他们从1953年开始便进行了铀矿石的自然浸出研究，利用铀矿石中存在的或外加的黄铁矿(FeS_2)在水和空气的作用下产生 Fe^{3+} 和 SO_4^{2-} ，使铀氧化为 UO_2^{2+} 而溶解出来。

我国早在汉朝就有使用细菌参与浸铜技术的记载。新中国成立以后，采矿界和微生物界对该技术也极为重视。1962年着手研究，1965年在冶金部铜录山铜矿用细菌浸矿法成功地回收了残留的铜矿。中国微生物研究所、核工业北京冶金院和711矿联合开展了含铀贫矿细菌浸出试验，并于1968年写出了试验报告。之后因各种原因一直处于停滞状态。1988—1991年，核工业711矿在主矿带130 m中段33[#]矿房内试验了“残留淋浸采矿法”，率先在生产中应用细菌浸铀取得成功。今天，该领域的理论研究和推广应用推广工作正方兴未艾，硕果累累。

3.4.4.2 细菌的种类和特性

浸矿细菌是一种能在强酸性甚至有重金属离子存在的矿坑水中生存的特殊微生物，其种类繁多，已知可用于浸出金属的菌类达三四十种。菌种可能来自自然状态，也可以用人工方法培植。

能用于工业生产的菌种主要有氧化硫硫杆菌、聚生硫杆菌、氧化铁硫杆菌、氧化铁杆菌和氧化硫杆菌等。它们是单细胞微生物，直径 $\phi 0.25 \sim \phi 0.6 \mu\text{m}$ ，长 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。基本特征表现为：

- ①一般在 $\text{pH}2 \sim 4$ ，温度为 $30 \sim 35^\circ\text{C}$ 条件下生长良好、繁殖速度快；
- ②当温度达到 60°C 时，便不能生长；

③低温条件下,甚至会死亡或活动能力差。

氧化硫杆菌为化能自氧菌,它把元素硫氧化生成硫酸,利用这一反应生成的能量作为其生活能源,以 CO_2 和氨为原料合成菌体进行繁殖;氧化铁硫杆菌和氧化铁杆菌,以 Fe^{3+} 作为能源在含有矿物盐类强酸性介质中生长。

对于铜和铀浸出工艺最有价值的为氧化铁硫杆菌,能氧化金属硫化物、硫酸亚铁、硫代硫酸盐以及元素硫。

几种常见的菌种及其特征和生长条件见表 3-14。

表 3-14 几种常见的菌种及其特征和生长条件

菌种	氧化亚铁硫杆菌	氧化硫杆菌	排硫硫杆菌	蚀阴沟硫杆菌
特征	该菌在含亚铁的培养基中由于能将亚铁氧化成高铁,而使培养基由浅绿色变为红棕色,最后由于 Fe^{3+} 水解生成氢氧化物或铁矾而产生沉淀	该菌的亚铁培养基保持清澈,由于三价铁的产生,迅速由琥珀色转为红褐色	该菌靠氧化硫代硫酸盐成硫酸盐获得能量: $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, Na_2SO_4	该菌与氧化硫硫杆菌相类似,但它可以利用硝酸盐或铵离子作氮源,不能利用亚硝酸盐
生长条件	pH 1.5 ~ 3.5 (最佳 2.0), 温度 16 ~ 40℃ (最佳 30 ~ 35℃)	pH 1.4 ~ 6.0 (最佳 2.5 ~ 5.8), 最适温度为 25 ~ 30℃	pH 4.5 ~ 7.8 (最佳 6.6 ~ 7.2), 最适温度为 28℃	pH 1.4 ~ 6.0 (最佳 2.5 ~ 5.8), 最适温度为 25 ~ 30℃

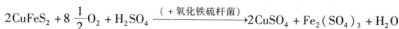
3.4.4.3 细菌浸矿原理

研究和试验表明,细菌在浸矿过程中的生物化学作用主要表现为直接作用、间接作用以及复合作用。有学者对细菌的破硫膜作用也进行了相关研究。

(1) 直接作用

所谓细菌直接浸出是指不依赖于 Fe^{3+} 的触媒作用,细菌的细胞和金属硫化矿固体之间直接紧密接触,通过细菌细胞内特有的铁氧化酶和硫氧化酶直接氧化金属硫化物,使金属溶解出来。

比如,黄铜矿 (CuFeS_2) 本来在酸性溶液中是不溶性的,是浸出时最难以氧化的硫化物,但在氧化铁硫杆菌的作用下,可直接离解成硫酸铜,氧化速度剧增:



黄铜矿的室内浸出试验表明,有细菌参与浸出时,12 天内即可浸出 72% 的铜,而在无细菌参与的对比试验中,24 天内仅能浸出 5%。

(2) 间接作用

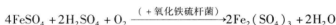
由于氧化硫硫杆菌、氧化铁硫杆菌等浸矿细菌具有氧化低价铁和元素硫生成高价铁和硫酸的能力,人们则利用这些细菌所生成的氧化产物硫酸高铁和硫酸对沥青铀矿等主要铀矿物进行溶解和氧化。 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 能将不溶于水的四价铀氧化成溶于水的六价铀,从而达到浸出的目的。

例如多金属矿中铜金属的浸出反应过程中细菌所起的作用即属于间接作用。浸出过程的基本流程如下:

首先,空气和水存在的情况下,黄铁矿(FeS_2)可氧化成硫酸亚铁及硫酸:



其次,酸性环境中,氧化铁硫杆菌等细菌将以比无细菌的自然氧化速度快50万倍的速度将硫酸亚铁氧化成硫酸铁:



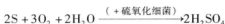
接着,生成的 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 将金属硫化物中的有用金属以硫酸盐的形式溶解出来,比如,对辉铜矿(Cu_2S)而言反应式为:



对黄铁矿(FeS_2)而言反应式为:



反应中生成的 FeSO_4 在铁氧化物的作用下被氧化成 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$,而反应中生成的硫也在硫氧化细菌的作用下生成硫酸:



如此反复,各种反应在溶液中不断进行。

(3) 复合作用

是指在细菌浸出过程中,既有细菌直接作用,又有通过 Fe^{3+} 氧化的间接作用。有时以直接作用为主,有时则以间接作用为主,但两种作用都不可排除,这是至今为止绝大多数学者所赞同的观点。

(4) 破硫膜作用

有的学者认为,在浸矿过程中,矿石块表面覆盖着硫的薄膜,阻碍了溶浸液与矿石块表面的直接作用,若有细菌存在,可以将硫薄膜氧化或破坏,使金属得以继续浸出。

3.4.4.4 细菌培养基及菌种的保藏

(1) 细菌培养基的分类、作用和用途

细菌培养基与细菌数量直接相关,而细菌数量的多少与浸矿效果有直接的关系。因此,为提高细菌浸矿的效果,必须为细菌生长创造最佳的环境,为此必须研究最适于细菌繁殖的“培养基”。

培养基是指用人工方法配制的专供微生物生长繁殖的营养混合物。用于细菌浸矿的主要微生物培养基有液体培养基、半固体培养基和固体培养基。

① 液体培养基。

是指营养物质以溶质状态溶解于液体中,使微生物能更充分地接触和利用养分,因而也能更好地积累代谢产物。

在实验室:液体培养基主要用于生理代谢研究及获得大量菌体。

在生产中:液体培养基主要用于大规模生产及发酵。

② 半固体培养基。

在液体培养基中加入0.2%~0.5%的琼脂作凝固剂,就可得到半固体培养基。半固体培

培养基呈现出在容器倒放时不至流下,但在剧烈振动后能破散的状态。

半固体培养基在微生物实验中有许多独特的用途,如可观察细菌的穿刺接种、观察细菌的运动能力、各种厌氧菌的培养及菌种的保藏等。绝大多数浸矿细菌是运动的,可通过这种方法来鉴定菌种。

③固体培养基。

即在液体培养基中加入1%~2%琼脂或者5%~12%明胶作凝固剂,就可制成遇热可融化,冷却后则凝固的固体培养基。

固体培养基主要用于菌种的分离、菌种的保藏、菌种的鉴定等。

氧化铁杆菌和氧化铁硫杆菌使用的培养基见表3-15。

氧化硫杆菌使用的培养基见表3-16。

氧化铁硫杆菌使用的培养基见表3-17。

表3-15 氧化铁杆菌和氧化铁硫杆菌使用的培养基

组成成分		莱顿氏培养基	OK培养基
基本盐类	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.15 g	3.0 g
	KCl	0.05 g	0.1 g
	K_2HPO_4	0.05 g	0.5 g
	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.05 g	0.5 g
	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	0.01 g	0.01 g
蒸馏水		1 000 mL	700 mL
10 NH_4S			0.1 mL
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$		浓度为0.1 g/mL的溶液 10 mL	浓度为0.15 g/mL的溶液 300 mL

表3-16 氧化硫杆菌使用的培养基

组成成分	瓦克斯曼培养基	ONM培养基
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.2 g	0.2 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.5 g	0.03
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.25 g	0.03
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.01 g	0.001 g
K_2HPO_4		0.4 g
蒸馏水	1 000 mL	100 mL
硫磺粉末	1 g/100 mL	1 g

表 3-17 氧化铁硫杆菌使用的培养基

组成成分	可尔马培养基
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	5 g
K_2HPO_4	3 g
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.2 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.1 g
CaCl_2	0.2 g
蒸馏水	1 000 mL

(2) 菌种的保藏

活性优良菌种应及时进行保藏。菌种的保藏要达到不死亡、不变异两个要求。为此,必须使菌种处于不活跃状态。长期保藏菌种的方法很多,但对浸矿菌种来讲,采用砂土-黄铁矿保藏法和冰冻干燥法较为有效。

(3) 细菌的驯化培养

是指用某一特定因素长期处理某微生物的群体,同时不断地对它们进行接种传代,以达到使菌种由逐步适应其环境变为适应环境最终能生长繁殖的目的。

例如,在装有一定体积培养基的三角瓶中加入较低浓度的金属离子,然后接入要驯化的细菌进行恒温培养,开始细菌不适应,要较长时间才能生长,待细菌适应并能正常生长后,再将它转移到会有更高浓度金属离子的培养基中继续培养。依此类推,叫做细菌驯化。

3.4.4.5 如何提高细菌浸出的效果

细菌数量的多少直接关系到细菌浸矿的浸出效果。因此,要提高其浸出效果,就必须了解对细菌生存、繁殖起关键作用的影响因素,并有的放矢地采取相应措施。这些关键影响因素表现在矿物本身性质以及细菌生长、繁殖环境条件两个大的方面,具体的参数有:矿石的性质、矿石的粒度、温度、pH、培养基成分、通气量、铁离子、光线、铵离子浓度等。

(1) 矿石的性质

矿石的透气性、矿石的物理化学性质会影响细菌与矿物的作用。一般来说,矿石堆越高,或泥含量多,堆内孔隙率越小,细菌存活所需的氧气就越少,影响细菌的活性,对浸出不利。

(2) 矿石的粒度

矿石粒度越细,接触面越大,对浸矿越有利。

(3) 温度

温度是影响细菌生长的重要条件之一,温度太高或太低都不利于细菌的生长、繁殖。

(4) pH

浸矿用的氧化亚铁硫杆菌是一种产酸又嗜酸的细菌,环境酸度对细菌生长有明显的影响。有资料报道细菌氧化 Fe^{2+} 最合适的 pH 为 1.5~2.5。

(5) 培养基成分

有研究表明:矿物金属的浸出速度和浸出介质中的细菌浓度成正比。要想获得矿物

浸出的高速度,则必须保持细菌生长繁殖的高速度。

(6) 通气量

浸矿细菌一般为好氧菌,靠大气中的 CO_2 作为碳源,所以在这类细菌的培养和浸出作业中,充分供气是很重要的。

(7) 铁离子

在细菌生长环境的各种金属中,铁离子是特别重要的, Fe^{2+} 是氧化亚铁硫杆菌的能源,细菌将 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} 而获得能量, Fe^{3+} 是金属矿物的氧化剂。

(8) 光线

所有微生物对紫外线都很敏感,所以可用紫外线灭菌。而对于浸矿的细菌如直接暴晒在阳光下,细菌会繁殖很慢甚至死亡。

因此,在黑夜与白天阳光两种不同的条件下,细菌浸出的效果显然是不一样的。所以,我们对配液池(池中有细菌)和生物反应器加盖,或搭棚子,以避免强阳光的直接照射。

(9) 铵离子浓度

铵离子(NH_4^+)是所有细菌生长所必需的。在用氧化硫硫杆菌浸出黄铜矿和用氧化铁铁杆菌浸出黄铜矿时证明,铵离子的浓度对细菌的繁殖有明显的影响。

(10) 其他影响因素

实践证明,振荡能促进细菌繁殖,用空压机向培养池子通气,既供氧又起搅拌作用。

3.4.4.6 细菌的培养

细菌的培养方法可分为试验室培养法及工业生产培养法。

比如,氧化铁硫杆菌和氧化硫杆菌的试验室培养基本步骤如下:

①在 250 mL 的玻璃三角瓶中装入 100 mL 配制好的培养基。

②加入 1~10 mL 酸性矿坑水或若干克潮湿矿泥或岩心,测定 pH,置于 28~32℃ 的恒温箱内进行静止培养,或置于转速为 140~200 rad/min 的旋转摇床进行振荡培养。

③判断是否有细菌生长。方法有三种:肉眼察色(若培养基由浅蓝色 FeSO_4 转变为朱红色 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 或由清晰透明变得浑浊都意味着有细菌生长);测定 Fe^{2+} 氧化率和 pH 以及用显微镜来观察细菌的形态和数量。

工业生产中细菌的培养方法又分为间断培养法和连续培养法。

间断培养法是将培养完毕的 20%~30% 的菌液留在培养器中作为菌种,其余的投入溶浸液用于浸出作业。接着在盛有菌种的培养器中注满置换装置尾液,进行通气培养。当二价铁全部氧化成三价铁时,重复以上的步骤,循环往复。

连续培养法是使置换装置中的尾液源源不断地从一侧注入培养容器,培养好的菌液接连不断地从另一侧流出用于浸出生产,生产过程是连续的。连续培养过程中应注意以下几点:

- ①第一次培养中要使细菌生长处于呈对数函数上升的阶段,并达到最大值;
- ②保持稳定的最大许可流量;
- ③保证尾液已经流入能通过搅拌达到充分混合;
- ④为细菌生长提供理想条件。

3.5 浸出液中目标金属的提取机理与方法

3.5.1 概述

在溶浸采矿中,经过浸出,矿石中的有用组分进入浸出液中,有用组分的含量均较低。通常,铀的含量为每升十到几百毫克,高的也不过几克;铜的含量为每升几克到十几克,高的也只有几十克,而杂质的含量却较高,如游离的硫酸及铁、磷、铝、锰、钒、钙、镁、硅、钼等。此外,还有泥质、羧类有机质等。如何将目标金属从浸出富液中有效地分离(提取)出来,是整个溶浸采矿工艺中的重要一环。

从浸出富液中提取金属的实质是创造条件使溶液中各种离子处于不稳定状态,通过一定的工艺手段,使有用组分能顺利地分离出来。目前常用的方法有置换沉淀法、离子交换法、溶剂萃取法、活性炭吸附法及电解沉积法等。用得较少的方法还有水解提纯法、硫化沉淀法、高压氢还原等提取方法。

3.5.2 置换沉淀法

置换沉淀法的基本原理是根据浸出液中金属离子的电化顺序,用电化顺序高的贱金属取代电化顺序比较低的贵金属,并使之沉淀。如用铁置换沉淀浸出液中的铜,除铁以外的其他金属,如铅、锌,都可以用来置换沉淀铜,但费用昂贵,因此铁是唯一适用的金属置换剂。



置换作业是在“之”字形置换流槽或锥形置换塔中完成。实践证明,铁屑置换时,浸出液pH控制在2左右合适。pH<2时,铁屑白白消耗在析氢上面,铁屑消耗量通常是理论值的2~4倍。酸度过低同样不好,因为会导致铁的碱式盐和氢氧化物的同时沉淀,降低海绵铜的品位。

置换用的铁,应有较大的比表面积,且比较纯和,无油质、氧化等污染。最常用的有车床铁屑、白铁皮和海绵铁。白铁皮可来自罐头盒、制造厂废品、车床铁屑,罐头盒应切碎,以增加比表面积。使用前应除去锈、漆、油等非铁杂质。

置换沉淀法虽然存在效率较低,产品质量不稳定等不足之处,但由于设备简单,操作容易,不耗用化学试剂,动力消耗少,所以世界各国在从稀溶液中回收铜时都采用它。若有些矿山的最终产品不是海绵铜,而是用蒸发的方法得到五水硫酸铜($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)产品,则不用铁置换法。

3.5.3 离子交换法

离子交换法,又称树脂吸附法。它是浸出液中某种离子与固体离子交换剂(树脂)的可交换离子之间的化学置换过程。它的优点是:①选择性好,能获得纯度较高的铀化学浓缩物;②既能从清液中提取铀,也可从矿浆中提取铀,这很适用于溶浸采矿法的吸附;③离子交换树脂能反复使用;④化学试剂和材料消耗量少;⑤吸附尾液可返回使用。

离子交换法的操作包含吸着、洗涤、淋洗、再洗涤几个步骤(图3-45)。

吸着指含有价金属的溶液通过树脂床,需回收的金属离子便离开水相进入树脂相。当树

脂床被进入溶液中的金属离子饱和时,流出液便出现金属离子,此时便停止给料。

淋洗前用水将松散吸着的离子洗出,为获得高纯度金属液做好准备。

淋洗指用适量的淋洗溶液,将全部金属从离子交换树脂上洗脱下来。获得的高纯度含金属洗出液可进一步处理回收金属。

接下来再用水将交换床进行洗涤,其作用是为了使离子交换树脂的再生性能更趋完善。

金属离子被树脂吸附的程度由 Nerst 分配定律确定,即金属离子在树脂相的浓度与金属离子在水相的浓度之比恒定。该比值越大,说明该树脂对该金属的亲合力越大,离子交换法提取金属的效果也越好。

离子交换树脂的高分子是由柔切的聚合物分子的相互交错线形物构成的。它含有活性基团(又称官能团),能与其他物质进行离子交换。基团由含有不动的刚性连接的固定离子以及与其固定离子电荷符号相反的反离子组成。反离子电荷为正时称为阳离子交换树脂,反之则为阴离子交换树脂(图 3-46)。

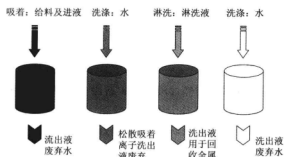


图 3-45 离子交换法操作步骤

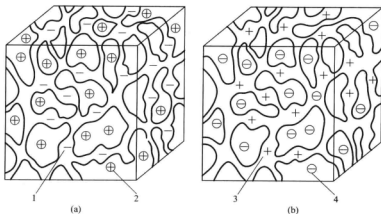


图 3-46 离子交换树脂空间模拟示意图

(a)—阳离子交换树脂；(b)—阴离子交换树脂；1、3—带固定离子的基体；2、4—反离子

离子交换树脂的最简单形式是海绵型离子交换剂,反离子在其间隙中游动。当这样的海绵浸入溶液时,反离子就离开海绵的孔隙而转入溶液中。为了保持海绵的电中性,应有当量的其他离子从溶液进入离子交换剂中。设 A 和 B 为交换的离子,其交换反应式如下:



因为在离子交换剂相中,反离子(A)的浓度高,当离子交换剂与电解质溶液接触时,反

离子就竭力向浓度低的溶液中扩散；为了保持离子交换剂的电中性，就需要从溶液中吸附当量的同电荷离子(B)，离子B应占据因反离子A离开树脂而游离的活性基团。各离子的重新分布，一直要进行到动力学平衡为止。

一般来说，离子交换树脂具有如下的基本特性：

①树脂直径一般为0.6~1.2 mm的球状体，颗粒越小，其表面积越大，交换反应越容易进行，但过小不利于溶浸液分离。

②树脂难溶于水溶液，且交联度越大就越难溶解。

③树脂泡水后，将水分子吸入其内产生膨胀，质量增加，如201×7型树脂含水量一般为40%~50%，交联度大，膨胀性小。

④树脂密度有干密度和在水中膨胀后的密度(湿密度)，如201×7型树脂的密度为1.09~1.13 g/mL。

⑤交换容量：一般以单位质量(g)干树脂或以单位体积(L)湿树脂吸附溶液中离子当量数表示，如毫克当量/克干树脂或毫克当量/升湿树脂。现在实际生产中用得最多的是后者。

⑥选择性：树脂对溶液中所存在的各种阴离子的亲和力是不同的，某些离子比另一些离子结合更紧密，这种性质叫做树脂的选择性。

一种好的离子交换树脂应满足以下两个基本要求：

①无论常温或高温下，都不应溶于水、酸或碱的水溶液，以保证能反复使用；

②应具有抗磨和抗冲击负荷的高机械强度。

3.5.4 溶剂萃取法

有机溶剂萃取法，简称萃取法。它实际上是一种液体离子交换方法，利用溶质在两种互不混溶的液相之间分配比恒定的原理，即

$$k = \frac{A_o}{A_w}$$

式中： k ——常数；

A_o ——金属A在有机相中的平衡浓度；

A_w ——金属A在水相中的平衡浓度。

用不溶于水的有机溶剂，从水溶液中提取金属离子，使该金属富集或除去其他杂质，然后将分离后的有机相与某种水溶液混合，使金属重新转入水相中。比如，萃取法提取铀时，用一种与水不相混溶的有机溶剂与含铀的浸出液相互接触，将浸出液中的铀提取到有机溶剂中，与浸出液中的杂质分开，以达到提取和纯化铀的目的。

溶剂萃取法的操作也可分两步，即萃取和反萃(图3-47)。

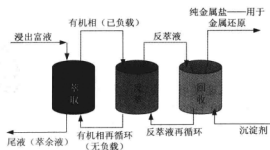
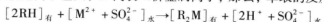


图3-47 溶剂萃取法操作步骤

(1) 萃取

将水溶液与不相混溶的有机溶剂搅拌，把水相中的有用金属萃取至有机相，然后两相分离，保留负载有机相，舍弃水相（也可以用于再循环）。

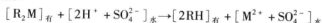
用 R 代表萃取剂阴离子基团，M 代表二价金属离子，那么，萃取的反应式如下：



(2) 反萃

以适量的溶液与负载有机相搅拌，回收有机相中的有价金属，可以得到相当纯的有价金属富集液。经反萃的溶液经过配制，可以循环使用。

反萃的反应式为：



萃取法的最大优点是能获取纯度很高的金属富集液，但萃取剂一般都较贵。

目前能直接用于工业上的萃取剂主要有：含氮化合物（胺类）、中性有机磷化合物（磷酸三丁酯）及酸性烷基磷酸酯等。对萃取剂的理想要求如下：

- ①有选择性；
- ②萃取量大；
- ③易于反萃；
- ④易于分离，如与水的密度差别显著、粘度小、表面张力大；
- ⑤使用安全，如无毒、不易燃烧、不挥发；
- ⑥与酸碱接触时稳定，萃取与反萃过程中不水解；
- ⑦成本合适。

3.5.5 活性炭吸附法

从氰化物浸出液中回收金、银，过去多用锌置换沉淀法。用这个方法对吸附液的条件要求较高，而且金银等贵金属损失量较大，所以近年来较多用活性炭吸附和树脂吸附方法，对吸附液可以不需净化和固液分离，金损失量少，成本低，投资省，对含金量低于 1.4 g/t 的贫液尤为适宜。

活性炭吸附法一般包括吸附与解吸两个步骤。

(1) 吸附

炭吸附是在多段逆流连续吸附装置（如串联的炭吸附塔）内进行的（图 3-48）。

富液以 1~1.7 L/s 的流速自下而上泵入，液流速度可以使粒径为 6×12 目或 16×30 目的粒状活性炭保持流化状态。富液与活性炭相向逆流运动，待饱和载金炭含金为 3 500~7 000 g/t 时，取出进行解吸。

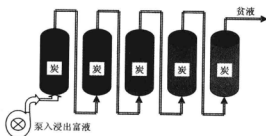


图 3-48 炭吸附作业示意图

(2) 解吸

从载金炭上解吸金银的方法一般有三种：

①常规法

解吸液: 1.0% NaOH + 0.1% NaCN; 工作温度: 93℃; 解吸时间: 24 ~ 48 h。

②甲醇法

在解吸液中加 20% 的甲醇或乙醚, 解吸时间 5 ~ 6 h。

③高温高压法

用 0.4% NaOH 的溶液, 在 150 ~ 200℃ 的温度和 0.35 ~ 0.63 MPa 压力下解吸, 解吸时间只需数 10 min。

解吸后的炭, 经酸洗, 置于间接加热的回转窑内, 在 700 ~ 750℃ 温度下用蒸汽处理, 去掉细粉后即可重复使用。

炭吸附法的主要优点在于能从含金银的悬浮液吸附金银而无须澄清和过滤, 也不必真空除气。含金浓度低至 0.0015 g/L 还能吸附, 对环境的影响也较其他方法要小。

炭吸附法也是从氯化物溶液中沉淀铂、钯、铑的好方法; 能利用铼和钼的吸附作用的差异, 从酸溶液中进行选择分离。

一般认为, 活性炭对氰化金络离子 $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ 的吸附是一个电化学过程。

当氧与炭悬浮液接触时, 被还原成羟基, 并释放出 H_2O_2 和 OH^- , 即



因为电子是炭给的, 所以炭就带上了正电荷, 为了在炭的表面保持电中性, 阴离子被吸附到炭中, 形成了吸附。

3.5.6 电积法

经过不同净化手段, 如离子交换, 溶剂萃取, 置换沉淀或活性炭吸附等处理后, 已经获得高含量、高纯度的含金富液。此时, 富液中金属含量或金属离子浓度以及杂质含量均已达到进入电积工序前的规定标准, 可用电解沉积的方法来获得最终产品。

电积是在电积槽内进行。用作电极的材料根据电积目的不同而不同。

电积铜时, 一般采用铅银合金、铅铋合金作不溶极, 用紫铜作始极板。进口处铜富液含铜 30 ~ 60 g/L, 硫酸 100 ~ 170 g/L, 输入直流电压 50 ~ 100 V, 槽电压 1.8 ~ 2.4 V, 电流密度 80 ~ 300 A/m², 溶液循环流速 5 ~ 10 L/min, 电流效率 65% ~ 85%, 电能单耗 2 000 ~ 2 500 kW·h/(t·Cu)。

电积金时, 一般采用不锈钢作不溶极, 以不锈钢丝绵作阴极, 钢丝绵布置密度 16 kg/m²。电积槽电压 2.5 ~ 3.5 V, 电流密度 30 ~ 40 A/m², 电积时间 15 ~ 30 min。进口处富液含金 50 ~ 200 g/t, 电积尾液含金低于 1 g/t。沉积在钢丝绵上的贵金属, 通过坩埚熔融、盐酸溶解或再电积予以回收, 并溶解铸成金银合质锭。

电积法不需复杂的金泥富集处理工序和为精炼所做的准备工作, 能大大降低试剂消耗量。

电积反应是有电流通过固-液交界面的条件下多相反应动力学过程。电积反应式可简单地认为是金属离子 (M^{2+}) 被电子 (2e^-) 中和还原成中性金属原子 (M_0) 的过程, 即



金属离子被电流中和的速度等于阴极放电的速度 (u), 即

$$u = \frac{I}{nF}$$

式中: I ——电流;

n ——金属离子的原子价;

F ——法拉第常数, 为 96 500。

速度 u 也是法拉第定律给出的电积时金属沉积速度, 单位为 mol/L。

在稳态下, 扩散过程的速度与放电速度相等, 即

$$\frac{I}{nF} = \frac{DS}{\delta} (C - C_i)$$

式中: D ——扩散系数;

S ——接触面积;

δ ——扩散层厚度;

C ——主体溶液中金属离子的浓度;

C_i ——电极反应区内金属离子浓度。

电解沉积时, 金属沉积速度与电流大小成正比, 与金属的原子价成反比, 并且与温度、压力、浓度无关。

此外, 电解沉积时, 金属的沉积晶粒的大小与致密程度取决于晶粒的形成与晶体成长两个过程速度之比, 当过程由扩散控制时, 界面上金属离子的浓度、晶核形成速度超过晶体成长速度, 沉积金属呈粉末状。而当其过程由化学反应控制时, 则相反, 沉积金属易形成较粗的晶粒。

3.6 浸出过程控制与浸出效率

3.6.1 浸出过程控制基本内容

溶浸采矿中的浸出过程不仅是化学热力学过程, 也是多相反应动力学过程。整个浸出过程包含外扩散、内扩散、表面化学反应与相变化、内扩散和外扩散 5 个步骤 (图 3-49)。

从化学浸出过程的基本步骤不难发现, 整个浸出过程既是一个溶解化学反应过程, 也是一个扩散过程。化学反应速度通常都很快, 但受扩散速度制约。因此, 在整个化学浸出过程中起控制作用的常常是扩散过程。

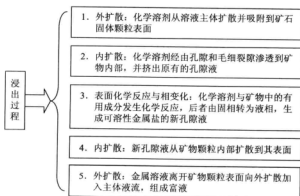


图 3-49 化学浸出过程基本步骤

扩散速度通常用 Fick 定律来计算。以酸浸为例, 扩散速度 dc/dt (cm/s) 与反应剂的扩散

系数 $D(\text{cm}^2/\text{s})$ 、扩散层厚度 $\delta(\text{cm})$ 、反应剂在溶液中的浓度(如 $[\text{H}^+]$ mol/L)、液固相界面面积 $S(\text{cm}^2)$ 有关:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{DS}{\delta} [\text{H}^+]$$

从理论上讲,为了加速溶浸过程,可以提高溶浸液中的反应剂浓度,增加溶液流速,扩大并不断更新液-固相界面面积,减少界面层厚度和阻力,改善矿石本身和矿堆内部的渗透性。

3.6.2 提高浸出效率的有效方法

在具体浸出作业中,为了提高浸出效率还必须根据具体情况进行具体分析,对浸出过程加以控制,有的放矢地采取行之有效的措施。

下面针对废石堆浸法浸铜以及矿石堆浸法浸金两种情况,讨论提高浸出效率的一些具体措施。

(1) 废石堆浸法浸铜

① 确保溶浸液在整个废石堆中分布均匀。

这方面的影响因素主要有筑堆工艺、筑堆几何尺寸、布液方式等。因此,筑堆时,应借助筑堆工艺的改进,尽可能避免物料空间分布上的粗细分布不均,保证整个矿堆具有较均匀的渗透性。筑堆的几何尺寸也会直接影响浸出效果,显然,太低太小不利于提高浸垫的利用率并影响生产能力,太高太大同样会影响浸出作业的高效进行。此外,布液方式、布液网孔等参数也必须经过仔细的计算、测试和确定。

② 溶浸液的温度控制。

温度是影响化学反应速度的重要因素,因此,对于以化学反应为基本工作原理的溶浸采矿工艺而言,确保浸出作业过程中浸出剂与矿物反应的环境温度在一个合理的范围十分重要。基本的做法是尽可能利用天然的温度。比如,对于气候温和的地区,温度的控制无需采取特殊措施就能保证在一个比较好的范围。在四季温差大的地区,则需根据浸出反应对反应温度的具体要求(比如,铜类矿物的微生物浸出最佳温度为 35°C),选择一个温度最适宜的季节作为浸出作业时间段。当然,对于那些因氧化反应会产生大量热量的矿石堆浸而言,还必须采取适当的降温措施,避免矿石堆自燃。

③ 溶液中铁盐控制。

浸出过程包括化学反应和物质的内外扩散过程,而且扩散过程在整个浸出过程中起着主导和控制作用。要确保扩散过程的顺利进行,必须保障各种通道的畅通无阻。然而,浸出反应中铁盐在通道中的沉淀,会严重影响溶液的流通。严重时铁盐在废石堆中的沉淀,甚至会形成不透水层,阻碍溶液流动,造成处在不透水层下的含铜物料无法与溶浸液接触。

要控制铁盐的沉淀,必须弄清其来源:其一,循环使用的尾液中含有大量的铁;其二,废石堆中含铁矿物的溶解。据此,为了最大限度地限制铁盐的沉淀,除了控制溶液的 pH 以外,在循环使用置换装置的尾液时,应采取必要的预先净化措施。

当铁盐已沉淀并妨碍生产时,必须予以清除。被阻塞的管道,一般用机械方法进行清理;周期性堵塞废石堆表面的沉淀铁盐,可用犁土机等设备进行松动处理,或用推土机将铁盐沉淀层刮走并推至废石堆边缘。但一旦矿石堆内部如果产生了大量铁盐沉淀,目前还缺少

有效的办法进行消除。因此,这种情况的应对措施应该以预防为主。

④水量控制。

溶浸采矿属湿法作业,水量损耗是不可避免的。在干旱高温地区,由于蒸发作用导致的水量损耗可达全部循环水量的5%~10%,因此,在浸出作业中需源源不断地补充水量。而在雨水充沛的地区,则更应防范雨水冲淡溶浸液的酸度及金属含量,影响溶浸及金属回收效果。这种情况下,为了隔断废石堆外的地表径流和防止大雨冲刷下来的淤泥等进入溶浸液回路,在废石堆范围外修筑截水沟、拦洪坝及储水池。

⑤pH的控制。

溶液的pH与浸出率密切相关,也是控制铁盐沉淀的重要因素。比如,当溶液中的pH大于3时,铁盐会发生沉淀;而pH等于2.4时,则可防止铁盐生成;当pH小于等于2.1时,可以使已经沉淀的铁盐重新溶解。

大多数废石堆中含有足够数量的黄铁矿,浸出时因为氧化作用会产生酸,再加上三价铁的水解和细菌作用,往往会使溶浸液的pH降低。但如果因为某些原因使溶浸液的pH增大并超过3的话,应该考虑往溶液中加入酸。

浸出液中铜金属含量通常控制在1~2 g/L,一般通过调整新旧溶浸区段的溶浸液的搭配、控制溶浸液的成分的温度等方法来保证。

(2)矿石堆浸法浸金

含金矿石堆浸法采金时,常用的溶浸剂为氰化物,其浸出效率同样受多因素的影响。为保证浸出作业的顺利进行,对浸出过程中一些关键的影响因素加以控制是必要的。

①氰化物及氧的浓度。

氰化物和氧的浓度是决定堆浸过程中金溶解速度的两个主要因素。在氰化物浓度低时,溶解金的速度只与氰化物浓度有关,当氰化物浓度高时,溶解金的速度还与氧浓度有关。图3-50为金、银在NaCN溶液中溶解时,氰化物浓度与溶金、银速度关系图。

当氰化物浓度低时(0.01%~0.06%),金、银的溶解速度随NaCN浓度的增大而提高;而当氰化物浓度大于0.1%~0.12%时,金、银的溶解速度反而变慢。

实践证明,单纯提高氰化物或氧的浓度并不能有效地提高溶解金的速度。要获得理想的溶解金的速度,必须使氰化物或氧的浓度保持一个适当的比例。实验证明,金的极限溶解速度发生在游离氰化物和氧浓度的摩尔比为6($[\text{CN}^-]/[\text{O}_2]=6$)的时候。

在金矿石堆浸实践中,一般将溶液中NaCN的浓度控制在0.06%~0.08%。当然,针对具体的矿石,要用实验来确定。至于氧浓度的保障,主要是利用间歇喷淋制度来实现。

②温度的控制。

金、银在氰化液中的溶解速度随温度的升高而提高。比如,在0.25%的KCN溶液中溶解金矿石时,温度低于85℃之前,溶金速度随温度升高而递增,当温度达到85℃时,溶金速度达到最大,而当温度超过85℃以后,由于高温导致溶液中氧的溶解度降低,致使溶金速度

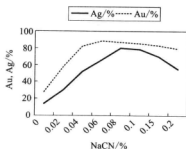


图3-50 氰化物浓度与溶金、银的速度关系

减慢(图3-51)。

温度过高会带来一些问题,比如,加大氰化物的蒸发损失量,使矿石中贱金属溶解,促进金属氧化物和碱土金属氰化物的水解,结果会导致氰化物的消耗量,降低溶浸液纯度,环境条件污染加剧,生产成本提高。实践证明,矿堆内的温度控制在20℃较为理想。

③减少氰化物的损失。

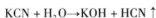
氰化物的用量占整个浸出作业成本中相当大的比例,因此,降低氰化物的损失不仅可以降低氰化物对环境的污染,也可以降低浸出作业的生产成本。

氰化物的损失主要分为机械损失和化学损失。

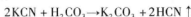
机械损失指作业过程中氰化物从各种设施中溢出、漏出等造成不能回收的损失,或废渣洗涤不完全而被带走造成的损失。降低机械损失的方法主要是靠工艺技术改造、设备更新和强化管理。

化学损失主要是因为:

A. 氰化物水解



B. 与 CO_2 氧化生成的酸作用形成挥发性 HCN



C. 与矿堆中的某些矿物作用形成硫氰化物或络盐,如



要降低氰化物的化学损失,就必须破坏或消除上述三类反应的进行,主要措施则是往氰化液中加入适量的碱。可用的碱可以是 KOH 、 NaOH 或 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。但从经济的角度考虑,通常选用石灰(CaO),因为 CaO 很容易变成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。

④其他杂质的控制。

氰化法堆浸过程中,还必须控制贱金属的硫化物、氧化物、硫酸盐、氢氧化物等与氰化物的反应,避免多余的氰化物损耗。具体做法如下:

A. 铁矿物。对含有硫化铁矿的金、银矿石,在堆浸前应用碱液浸洗。

B. 铜矿物。铜矿物与氰化物反应的强烈程度与氰化物的浓度关系密切。当氰化物浓度较低时,铜的氰化作用急剧降低。因此,控制铜的氰化作用的有效措施是,在保证金的氰化的前提下,尽量降低氰化液中氰离子的浓度。同时,也应保证浸堆中铜的含量不超过0.1%。

C. 砷、铋矿物。砷、铋矿物对氰化过程的负面影响最大,因为它们不仅会消耗氰化物和氰化液中的氧,还会生成一系列砷、铋盐类,容易在金粒上形成阻碍金溶解的薄膜,生成的氰化物还是污染环境的重要致因。然而,在浸出过程中,目前并没有能有效控制砷、铋矿物发生作用的有效技术,因此,为了确保金、银的有效浸出,必须在堆浸前将砷、铋矿物剔除。

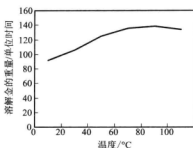


图 3-51 温度对金溶解速度的影响

3.7 化学浸矿法对环境的污染及其控制与治理

3.7.1 造成环境污染的成因分析

化学浸矿法的主要优点之一是该方法对矿山环境的保护作用。地表堆浸不需要繁杂的选矿工序,可避免由于破碎、磨矿所造成的噪声、粉尘及选矿药剂对环境的影响。地下浸出由于矿石浸出作业直接在地下完成,避免了地表植被的破坏,极大地保护了矿山环境。因此,溶浸采矿是实现矿山无废无害开采的重要技术手段之一。

尽管如此,溶浸采矿依然存在一些对环境造成影响的可能,如何想方设法降低该采矿方法对环境保护的负面影响,一直是相关工程技术人员、专家学者致力研究的课题。具体的研究内容视溶浸采矿工艺的不同而有所差异,比如,地表堆浸和地下浸出在对环境的污染成因就不相同,研究工作的重点也就不一样。

①地表堆浸。

地表堆浸对环境的污染主要表现为溶浸液的流失致地下水污染、尾液排放于环境的污染以及生产中产生的废渣处理问题。

②地下浸出。

地下浸出作业对环境的污染主要是对地下水系(质)的破坏,因此环境保护工作主要集中在对地下水体的污染控制以及如何恢复地下水水质等。

3.7.2 对环境污染的控制与治理

根据地表堆浸作业的基本特点及其对环境污染的主要致因,有效的环境保护措施应该是:

①以预防的方法尽可能减少或消除造成环境污染的成因。

具体地说,首先,应根据矿区地质、水文地质等资料仔细选择合适的堆浸场地;其次,在筑堆前根据需要还应铺设防渗漏垫,杜绝溶浸液渗入地下造成污染;再次,在浸堆范围以外开挖或修筑防洪沟、挡水墙、防洪储水池等设施,防止雨水冲刷矿堆,以免矿堆发生崩塌等环境污染事故;最后,浸出作业系统应实现溶液的全流程安全闭路循环,集液沟、储液池等应进行防渗漏处理,容量要有足够的余地,不致发生溶液溢出而造成损失并污染环境。

②以加强工艺过程控制和科学技术管理将环境污染控制在尽可能低的水平。

保证浸出工艺的科学合理性。浸出过程中,加强对矿堆周边的监测与管理,做到能及时发现问题,并及时采取措施解决问题。防止溶浸液或浸出液的外泄,防止输送管道的滴漏。回收金属后的尾液及矿堆洗涤液要闭路循环使用,严禁未达标的尾液外排。

③以有效的事后补救措施恢复矿区环境。

这方面的内容包括浸后矿堆的洗涤、矿渣的堆放以及复垦等。

酸浸后的矿堆要用碱性溶液(生产中常用廉价的石灰水)洗涤,以中和残留在浸堆中的酸性物质,要求洗涤后达到 $\text{pH} = 7$ 。

氰化物溶液浸金后的矿堆,一般先用清水进行洗涤,清洗液可返回溶浸液配制池作为下一矿堆的浸出液,直至洗涤液中氰根浓度降至 0.01% 以下。然后,在废石堆表面及水溶液中加入漂白粉来消除剩余氰化物等。当达到国家游离氰含量 0.05 mg/L 标准后排放。矿渣运至

废渣场堆弃。

当今社会对废石堆的复垦越来越重视。根据废石堆场地条件的不同,分为山坡废石堆的复垦和平地废石堆的复垦。

(1) 山坡废石堆的复垦一般步骤

- ①将废石坡修整成能长期稳定的斜坡或阶梯形山坡;
- ②铺盖0.3~0.4 m厚的黏性黄土;
- ③必要时,加铺0.2~0.3 m具有肥力的泥土;
- ④修筑坡底挡土墙;
- ⑤种草、植树等。

(2) 平地废石堆的复垦一般步骤

- ①将废石堆改造成台阶状,台阶高3~5 m,台阶平面宽2~4 m,台阶坡面角小于废石的自然安息角,且符合铺土要求;
- ②铺盖0.3~0.4 m厚的黏性黄土
- ③加铺0.2~0.3 m的腐殖质、具有肥力的土;
- ④废石堆底周边修筑挡土墙或砌筑毛石堤坝;
- ⑤台阶平面植树等;
- ⑥台阶斜面种草或播撒易生长的草籽。

地下浸出因大部分矿石的浸出都在地下完成,只有不到20%的矿石在地表浸出。地表浸出部分的环境保护问题可参照前面介绍的方法加以控制,也可将浸后废石返回井下充填采空区。

地下作业时,对环境的污染主要表现为浸出过程中,溶浸液漏失或残留在矿堆中,而致对地下水体产生的污染。

常见的地浸后矿场的地下水污染治理方法有4种:

①地下水清除法。

如图3-52所示,地下水清除法的基本原理是,通过不断地抽出被污染的地下水,在污染区形成负压区,并让周围的清洁地下水不断涌入,使被污染区的水质逐渐得到恢复。

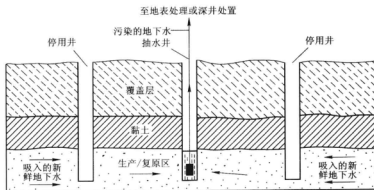


图3-52 地下水清除法

抽出的水一部分返回新的浸矿场，不需特别处理；另一部分则必须用反渗透、电渗析、直接沉淀和蒸发以及离子交换等方法进行去污染处理。地下水清除法能迅速、有效地改善污染成分浓度较高的地下水污染情况，但要使含水层地下水污染成分降低到较低的浓度，则要抽出大量的地下水量。

②反渗透法。

如图 3-53 所示，反渗透法是将污染的地下水抽出到地表经反渗透装置进行强化处理，渗透的清水重新注入采场，得到的卤水送去进一步处理。这样，污染的地下水不断被稀释并最终被净化的水所取代。

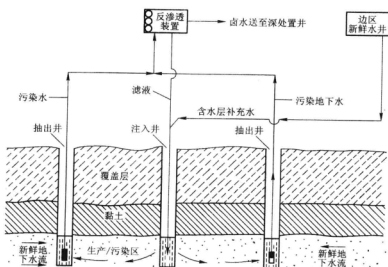


图 3-53 反渗透法

③自然净化法。

自然净化法是利用残留于地下的污染溶液与矿岩发生化学作用、离子交换、沉淀、被地下水稀释、自然水动力弥散及分子扩散的自然清洁作用，使污染逐渐消失。显然，这是一种成本最省的方法，但水质恢复期长。对于位于人口稠密、经济发达地区的矿山而言，这种方法难以完成在规定时间内恢复地下水质的任务。

④还原沉淀法。

将强还原剂注入含水层，能有效地还原沉淀一些有害元素，完成地下水污染治理的任务。但这种方法在具体实施中，必须防止注入的还原剂造成新的水污染问题。

第4章 化学浸矿理论与技术的实际应用

4.1 金属铜的浸出

4.1.1 贫矿或废石中回收金属铜

利用溶浸采矿技术回收贫矿或废石中的铜金属,在许多国家已得到广泛的应用。比如,堆浸法能处理的最低铜矿石含铜品位0.16%,而目前我国规定的露天开采的硫化铜矿石的边界品位为0.2%~0.3%,氧化铜矿石的边界品位为0.4%~0.5%,而地下采矿中所确定的同类矿石的边界品位还要高得多。也就说被常规露天矿开采方法和地下开采方法视为废石而抛弃的铜矿石中的铜,还可以利用溶浸采矿方法来加以回收利用。据计算,光一个德兴铜矿所抛弃的废石中就有数百万吨金属铜可以被利用。

铜矿物根据其化学组成的不同,可分为铜的氧化矿物和铜的硫化矿物。铜的氧化矿物中铜金属的浸出主要依靠稀硫酸溶液的溶解作用来完成。而对于大多数铜的硫化矿物而言,通常只要有氧化剂(氧、硫酸、硫酸铁和细菌),就可以形成可溶性产物。少数铜的硫化矿物,需要从外部获得一部分硫才能在溶液中形成硫酸盐,对这部分铜的硫化矿物而言,除了需要氧化剂外,还需要在溶液中有游离酸才能被溶解。

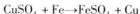
4.1.2 铜类矿物的浸出工艺

简单地说,铜矿石的浸出工艺系统由废石堆、废石堆浸出富液和沉淀尾液的储存池、置换装置及若干泵和输液管道所组成。作业时,用泵将含有硫酸亚铁和硫酸铁的硫酸溶液输送到废石堆顶部,令其渗入废石堆内部溶解铜矿物,浸出的含铜富液送到沉淀装置,用铁使铜沉淀,最后将含铁的尾液经补充酸和水后,再输送到废石堆继续溶浸矿物。

4.1.3 铜金属的提取过程

含铜富液中金属铜的提取方法采用的是沉淀置换法。考虑到由堆浸法获得的铜富液铜浓度低、杂质多,所以选择在经济上较合算的以铁置换溶液中的铜并使之沉淀析出的方法。

其置换作用的化学反应式是



上式的反应速度取决于液-固相界面处的化学反应速度和金属离子的迁移速度。

置换反应中需消耗大量的废铁,其来源主要有以下几方面:

(1) 铁质废罐头盒

通过灼烧去除标签纸、有机物等杂质,必要时还需用碱洗的办法除去不利于置换反应的锡。将处理过的罐头切碎。

(2) 工业生产中产生的边角废料

尺寸大小及纯度上均较理想的是制造罐头的过程中冲压、剪切所形成的边角料。其他如车床及其他切削机床所产生的铁屑也是废铁的来源之一,但由于夹杂有油及其他润滑剂,置换性能不佳。还有矿山和选矿厂等的重质废铁,因价格便宜而具有一定吸引力,但缺点是使用起来不是很方便(装载废铁和清洗置换槽困难)。

(3) 细粒海绵铁

高品位磁铁矿、铁矿石及黄铁矿烧渣,都是生产适于置换铜的海绵铁的重要原料。海绵铁作置换剂的优势是沉淀铜的速度快,但缺点是置换剂本身成本过高。

4.1.4 工程应用

矿产资源是地球赋予人类的宝贵财富,资源不会再生。如何利用先进的科学技术扩大资源的使用价值,挖掘现有地质资源的潜力,实现资源开发的多元化,提高资源整体开发效益,具有十分重要的意义。采用堆浸、萃取、电积工艺回收低品位矿石或废石中的铜正是实现资源综合利用的重要途径。该方法具有生产成本低、工艺简单、所用材料消耗低、用人少、劳动生产率高、投资省、建设周期短等优点,它既回收了重金属离子又保护了环境,一举两得,变废为宝,变害为利,已经在国内外得到了较广泛的应用。

在美国,杜瓦尔公司所属的一家露天铜矿曾完成了两个废石堆的浸出作业。处理的废石达 550×10^4 t,堆置面积 $32\,000\text{ m}^2$,最大堆高 76 m,取得了可观的经济效益。废石直接排弃在原有地表上,由汽车运输沿排土场边缘排卸,并由推土机整平后,在堆顶用喷淋法布液浸出。部分相关参数如下:

- ① 堆浸物料由辉铜矿、黄铜矿、铜蓝、石英二长岩、石英斑岩等组成;
- ② 矿区夏季平均气温 23.9°C ,冬季平均气温 4.4°C ;
- ③ 溶浸液为酸性水溶液, pH 3.5,含铜量小于 0.01 g/L ,尾液循环使用;
- ④ 布液方法为喷淋法,布液强度 $2.8\text{ m}^3/\text{min}$;
- ⑤ 浸出富液中含铜 1.24 g/L , Fe^{2+} 为 0.01 g/L , Fe^{3+} 为 0.47 g/L , pH 降至 2.4;
- ⑥ 在置换流槽中用沉淀置换法回收铜,每个流槽都分成 6 格,分格尺寸为 3.7 m (长) \times 1.3 m (宽),整个置换装置由 12 节流槽组成;
- ⑦ 置换剂为处理过的铁质罐头盒;
- ⑧ 流出置换装置的尾液含铜降低到 0.01 g/L , Fe^{2+} 上升到 2.45 g/L , Fe^{3+} 下降到 0.01 g/L , pH 升至 3.7;
- ⑨ 溶液中铜的回收率达 99%,每公斤铜的耗铁量为 1.4 kg 。

美国犹他州的一家矿山也进行过废石堆浸作业。处理的废石量达 40 亿 t。废石直接排弃在原有地表上,由汽车和列车运输沿排土场边缘排卸,并由推土机整平后,在堆顶用灌溉法布液浸出。相关参数如下:

- ① 堆浸物料由黄铜矿、辉铜矿、铜蓝、斑铜矿、氧化铜矿物、石英二长岩等组成;
- ② 矿区夏季平均气温 $23.9 \sim 29.4^\circ\text{C}$,冬季平均气温 $-6.7 \sim -3.9^\circ\text{C}$;
- ③ 溶浸液为置换流槽尾液, pH 2.8~3,含铜量 $0.12 \sim 0.18\text{ g/L}$,温度 $33.3 \sim 34.4^\circ\text{C}$;
- ④ 布液方法为灌溉法,在废石堆上沿条带挖掘成沟渠进行灌溉,布液强度 $37.9\text{ m}^3/\text{min}$,可增大到 $132.5\text{ m}^3/\text{min}$;

⑤浸出富液中含铜 1.8 g/L , Fe^{2+} 为 3.36 g/L , Fe^{3+} 为 1.44 g/L , pH 降至 2.5, 温度高达 $42.3 \sim 51.7^\circ\text{C}$;

⑥在锥形置换塔中用沉淀置换法回收铜, 置换塔直径 4.3 m , 深 7.3 m , 共有 26 个;

⑦置换剂为处理过的铁质罐头盒及碎边角料;

⑧流出置换装置的尾液含铜降低到 $0.02 \sim 0.05 \text{ g/L}$, Fe^{2+} 上升到 7 g/L , Fe^{3+} 为零, pH 升至 $2.9 \sim 3.0$ 。

⑨溶液中铜的回收率达 $97\% \sim 98\%$, 每公斤铜的耗铁量为 $1.5 \sim 1.8 \text{ kg}$ 。

在我国, 由于铜矿山多数处于资源枯竭的边缘, 新探明的接替资源严重不足。资源二次回收利用问题同样十分重要。资料表明, 我国铜矿资源以贫铜为主, 大型铜矿少, 500 万 t 铜储量的矿山只有江西德兴铜矿和西藏玉龙铜矿; 目前占储量 $2/3$ 以上的条件较好的铜矿山已经开采, 就地质资料而言, 我国还有 2000 万 t 铜金属储量的矿山尚未开采。而我国一直是铜消耗大国, 自产矿山铜精矿仅占铜消耗总量的 40% 左右, 因此非常有必要对我国的低品位铜矿资源进行加工利用, 解决我国铜工业存在的供需矛盾。

江西铜业公司德兴铜矿(图4-1)在露采过程中, 需要剥离堆存含铜 $0.1\% \sim 0.25\%$ 的废矿石, 仅铜厂矿区就有 3.26 亿 t , 含铜金属约 57 万 t , 整个矿区可供回收的铜金属量就更大了。然而, 这部分铜金属无法用传统的选矿-冶炼方法进行既经济又有效的回收。多年来, 该矿在科研机构的协助下, 先后进行了细菌浸出-萃取-电积湿法提铜工艺的研究, 取得了可喜的成绩, 为同类资源的二次开发利用积累了经验。



图4-1 德兴铜矿露天采矿场景象

江西铜业公司所属各大矿山的废石场, 尾矿库堆放的尾砂、地表难选的氧化矿石、表外矿、采矿场中残矿及矿坑的酸性废水等含铜资源的回收价值非常可观。据初步统计, 公司各矿山每年排出酸性废水中含铜金属量约为 $460 \sim 550 \text{ t}$ 。各矿山已采出的废石中含铜金属量约为 34.4 万 t 以上, 难选氧化铜中含铜品位较高, 其金属量可达 23 万 t 。此外在老采场残留矿石中、铁帽矿石中及尾矿中, 也有大量的铜金属量, 这些巨大的二次资源, 如能全部或部分回收利用, 将进一步增加企业的经济效益和延长矿山寿命。

目前, 公司资源二次利用主要集中在以下三个方面:

①从低品位矿石中回收铜。

在德兴铜矿, 采用堆浸、萃取、电积工艺回收低品位矿石中的铜起步较早。公司从 20 世纪 80 年代起, 对德兴铜矿中低品位矿石采用溶浸、萃取、电积工艺回收铜, 先后进行过多种小型试验研究和扩大试验研究。德兴铜矿杨桃坞、祝家、黄牛前 3 个废石堆场都在山谷中, 每个废石场在沟口狭窄处均有拦水坝和酸性水库, 并有污水处理工程。永平铜矿采场周围所有废石场地都设计了沟坝以及酸性水水库。公司各矿山废石场工程地质条件好, 矿山处于亚热带潮湿山区, 有利于细菌的繁殖生长, 生物催化反应比较强烈, 气候条件宜于堆浸, 多雨季季节浸出率上升, 对堆浸浸出速度有利。目前, 德兴铜矿已建成年产 2000 t 电铜的堆浸厂,

目前处于试生产阶段,已完成电铜 500 余 t,铜含量达 99.997%,超过了国家 A 级铜的标准。永平铜矿已建成年产 200 t 电铜的堆浸厂,武山铜矿及银山均已建成年产 100 t 电铜的堆浸厂,主要处理氧化矿和地表废石及表外矿石。各矿山酸性废水的综合利用均起步较早,普遍采用铁屑置换方法,获得海绵铜产品,都取得了可喜的成效。在尾矿中回收硫、白钨及非金属绢云母等产品,变废为宝,增加了矿山的经济效益。

在实施生产过程中严格管理,浸出率的高低直接影响企业的效益,应视不同矿石性质,充分做好最佳条件试验,严格控制生产条件,特别是矿石粒度、作业制度、喷淋强度、布液量、酸度等条件的控制。在堆浸施工前,应做好堆场地面防渗漏的处理,对堆场底部的植被及杂物应进行清除处理,并用黏土夯实,以防止浸出液渗漏,减少第三相的产生,以便达到预期效果。

②从酸性废水中回收铜。

酸性废水主要是指露天采场废水及井下矿山的坑道水。该公司各矿山酸性废水排放量大,特别是露天开采矿山,如德兴铜矿杨桃坞区段每年废水排放量达 146 万 m^3 ,含铜 100 ~ 150 mg/L,废水中铜金属量达 146 ~ 219 t。永平铜矿酸性废水每年可达 200 万 m^3 ,含铜 70 mg/L,废水中铜金属量达 140 t。井下开采的矿山如东乡铜矿、武山铜矿,其酸性废水量每年均在 140 万 m^3 左右,废水中铜金属量分别为 100 t 及 75 t。露天开采矿山的酸性废水,可采取相对集中的办法,用铁置换回收海绵铜。

井下矿山,酸性废水容易实现集中管理,各矿山自行组织回收海绵铜。武山铜矿一部分酸性废水,曾先后采用池式溜槽装置和沸腾置换装置回收海绵铜,取得了较好的效果。目前坑道水还被利用作为氧化矿酸浸的浸出剂,这样不仅回收了坑道水中的铜,而且降低了氧化矿酸浸过程中酸的消耗,降低了生产成本,又回收了矿产资源。

③从尾矿中回收白钨、铜、硫精矿等有用矿产。

尾矿的综合利用,既可以提高矿山经济效益,又可以减轻尾矿库负荷,相应减少尾矿的堆存量,延缓了坝的上升速度,有利于尾矿库的安全运行,同时也是拓宽企业生产经营门路、增强企业活力的重要途径。

此外,国内其他一些矿山也进行了铜的浸出回收试验,有些矿山已形成一定的铜浸出作业规模。比如,针对寿王坟铜矿的空区存窿矿石进行了室内摇瓶浸出试验和柱浸试验。试验表明寿王坟铜矿的矿石仅采用化学浸出,铜的浸出率较低,为 46% 左右,采用细菌浸出可将铜的浸出率提高 26%,达 72%。铜的浸出率与矿石的粒度成反比,即矿石的粒度越大,铜的浸出率越小。在生产中,先用酸浸出,然后再用细菌浸出的方案,既可加快铜的浸出,又可以降低浸矿时的酸耗,降低生产成本。

还有,福建紫金山铜矿是一个含铜低品位大型矿床,现已探明铜金属工业储量 253 万 t。但一直以来,由于原矿品位低、含砷量高,采用传统的浮选—火法炼铜工艺达不到预期目标,并会造成低品位铜矿资源的巨大浪费,于是紫金矿与研究院合作,携手攻关,以紫金山铜矿为试验基地,对目前国际上最受青睐的湿法提铜工艺进行研究和开发,现在已建成了年产 315 t 电解铜工业试验厂,生产的电解铜达到国家一级电解铜标准。目前,紫金山铜矿又开始着手建设年产 1 000 t 生物提铜工业试验厂,最终建成年产 1 万 t 电解铜的生物冶金工厂,将成为国内第一个具有工业规模的生物提铜基地。

4.2 金属金、银的浸出

4.2.1 金银类矿物的可浸性

金、银在氰化物中的可溶性是以溶浸剂来回收一些难采、难选或低品位金矿石中的金属金和银的理论根据。金、银的浸出效率与金矿种类、金的粒度及围岩成分有直接关系。含金矿石是否适于堆浸应考虑以下几方面的条件：

- ①金的嵌布粒度大小；
- ②含金成分能否与氰化物发生反应，即矿石本身是否具有天然的孔隙度和良好的渗透性；
- ③抑制金在氰化物中溶解能力的干扰成分；
- ④矿石是否含能吸附金络合物的、或使金过早沉淀的碳质成分；
- ⑤酸性物质含量多少，太多会加大石灰用量；
- ⑥矿石中含细粒和黏土的比例，太高会阻碍溶液的渗透。

当然，当采用堆浸作为金矿提金的重要技术手段时，为达到使金矿微粒与 NaCN 充分接触的目的，必须开发利用先进的选冶技术。同时，除了寻找新的高效的或无毒的浸金溶剂和加压氧化工艺、细菌氧化工艺、化学氧化工艺以及氯化法与含硫试剂氧化法等，还应该加大在改进浸金技术方法方面的投入，譬如，引进和推广应用喷淋和滴淋等通过管道添加氧化物的方法。

4.2.2 浸出剂的选取

浸出作业时浸出剂的选取一般应综合考虑矿石本身的物理化学性质、浸出剂制备工艺及价格、浸出效率高、对环境的影响程度等因素。

堆浸法回收金、银时，常用的溶浸剂为氰化物 (NaCN 或 KCN)。

溶浸剂的制备则尽量做到就地取材、就近建厂、定量生产、高效安全。同时，为了节约成本，减少对环境的污染，应尽可能控制氰化物的用量，并设法避免不必要的损失。

为此必须采用先进技术手段，确保生产过程中能高效、安全、环保地将浸金溶剂均匀地、可靠地分配并均布于黄金矿粉。目前不少金矿已经采用了喷淋或滴淋方法来达到此目的。但是喷淋方法有的不容易控制浸金溶剂的量，难以提高浸出率，同时喷洒到空中含氰化物的微小水珠容易扩散，对人体和环境造成伤害和污染等缺点。实践证明，通过管道添加氰化物的堆淋方式能更好地解决环保问题，降低能耗，优化浸金溶液配比，提高浸出率，减少浸金溶液用量。

4.2.3 金银的提取过程

从含金、银浸出液中回收贵金属的方法有活性炭吸附法、离子交换树脂法、溶剂萃取法和锌粉置换法等，它们的工艺流程图分别如图 4-2、图 4-3、图 4-4 及图 4-5 所示。

锌置换金、银的原理与铁置换铜是一样的，即利用电化顺序高的贱金属取代电化顺序低的贵金属，并使之沉淀。

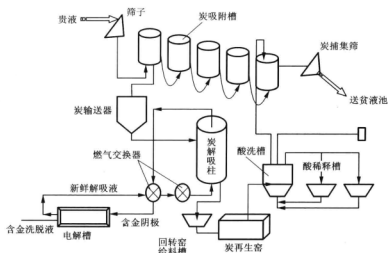


图 4-2 活性炭吸附法回收金的流程图

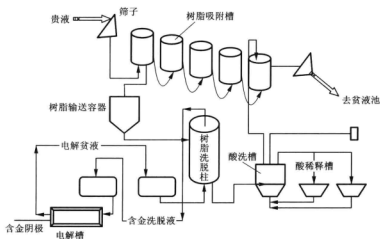
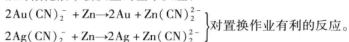
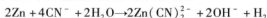


图 4-3 离子交换树脂法回收金的流程图

锌在含金、银的氰化液中会发生的基本反应：



以及不利于置换反应有导致氰化物消耗增加的反应：



在不产生 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 沉淀的前提下，应尽量增大 pH，以利于锌耗量的减少。此外，如果氰化液中含有氧，还会引起沉淀出来的金发生反溶，因此含金氰化液应先进行脱氧。

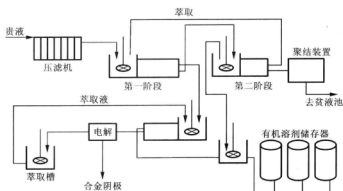


图 4-4 溶剂萃取法回收金的流程图示意图

在置换反应中，有氢气产生。如果集中在锌的某一分析析出，将会产生极化作用，使锌停止溶解，阻碍金的沉淀。解决这一问题的办法是在加入的锌中混入少量的铅或铅盐，则锌成为阳极，铅成为阴极。这样，氢气会在铅板上源源析出，锌将连续溶解，金便不断地被沉淀出来。

用金属锌从含金氰化液中置换沉淀金、银时，可用锌粉或锌丝。

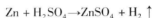
值得指出的是，金、银的沉淀速度与反应温度关系密切，应保证反应温度不低于 10℃。

浸出液中含有贱金属或可溶性硫化物，也会影响金、银的置换沉淀效率，消耗多余的锌，并降低沉淀金、银的纯度，应该引起注意。

锌置换沉淀出来的金泥，一般纯度不高，很少超过 20%，其中过剩的锌含量可能高达 50%。因此，为获得更高纯度的金，必须对金泥作进一步处理。常用的提纯方法有酸溶、焙烧和熔炼。

(1) 酸溶

用 10% ~ 15% 的稀硫酸溶液溶解、洗涤金泥，使金泥中的锌及其他可溶物质从金泥中分离出来。



硫酸的消耗量，一般为锌重量的 15 倍。

酸溶后的金泥与酸液分离后，还要用水洗涤，压滤后得到的金泥滤饼送去进一步焙烧。

(2) 焙烧

焙烧时将金泥放在铁盘中，若干个铁盘叠放到加热炉里，缓慢升温使金泥加热。温度控

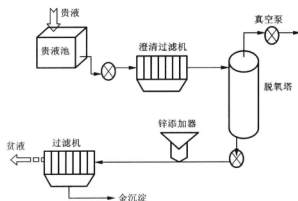


图 4-5 锌置换沉淀金的工艺流程图

制在碳酸盐、氰化物能解离的范围内,但应防止固体物料熔化。一般温度最高为600℃左右。

为避免受热时金泥粒粘在铁盘上,可先在铁盘上涂上石灰。为了使杂质在焙烧时氧化,可往滤饼中加适量的硝酸钾作氧化剂。焙烧过程不宜搅动金泥。焙烧后的金泥送去熔炼。

(3)熔炼

熔炼时,需根据金泥的成分,配入适量的熔剂(如碳酸钠 Na_2CO_3 、硼酸钠 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、石英砂 SiO_2 、萤石 CaF_2 等),放到坩埚炉、小型反射炉或小型转炉中熔炼。金泥中的氧化物与溶剂组成炉渣,金、银组成合金,两者互不相融而分离,即可铸成金、银合质锭。

4.2.4 堆浸法采金中的浸金溶液分布技术

堆浸法中溶液分布淋洒技术是堆浸法的关键技术。常用的布液方法虽然包括喷淋法、灌溉法、垂直管法等,但在堆浸法采金时主要采用的是喷淋法或滴淋法。

采用传统的喷淋进行堆淋的情况下,开始时,由于喷洒强度不超过矿粉的入渗能力,矿粉表面将不形成水层,这种情况下的入渗称为自由入渗。矿粉的入渗速度等于降雨强度。随着喷洒强度加大和喷洒时间的增加,矿粉表面很快形成积水层,形成板结,入渗过程转为有压入渗,淋洗的效率随着降低。

此外,喷淋时浸金溶剂内含的氰化物,会严重污染大气和水环境。过量使用氰化物会导致矿区污水处理和环境治理成本加大,导致生产成本提高。随着易浸金矿石资源的不断减少和世界范围内对环境保护要求的日益迫切,与工艺相配套的堆淋技术变得越来越重要,因此,喷淋工艺将会受到滴淋堆浸处理工艺的挑战。

堆浸处理工艺中采用滴淋方法也已经在发达国家得到发展,美国在许多矿区均采用此技术。采用此项技术后环境得到了很大改善,滴淋方法为美国黄金生产和矿区环境保护做出了贡献。

利用滴渗方法,溶液直接作用于矿粉堆表面,矿粉表面将不形成水层,入渗速度快,而且能够与浸金溶剂充分接触,并冲刷矿粉表面,这将对金粉的析出十分有利。

现代滴淋设备具有压力补偿、防止堵塞装置,出流均匀且可以根据矿石成分、品位和破碎程度采用最佳滴淋强度和浸金溶液浓度。

将滴淋技术应用于浸金溶液输送及将浸金溶液均匀地洒布于矿粉的方法,在国外已经得到广泛的应用。根据国外厂商的总结,滴淋有以下优点:

- ①高性能和高可靠性,容易安装;
- ②可以降低生产成本;
- ③消除风的影响;
- ④一年四季都可以运行;
- ⑤减少太阳紫外线对化学物质的破坏;
- ⑥减少浸金溶液的排泄和流失;
- ⑦节省贮液池和引水渠道建设费用;
- ⑧滴头自动清洗和防阻塞;
- ⑨减少对操作工人、周围环境和土地的影响,有利于环境保护。

滴淋可以增加溶液中空气的含量,这意味着增加参加化学反应的氧含量,增加了金矿析出的活性;滴淋系统可以精确控制氰化物溶液浓度,减少氰化钠在空气中的损耗量;滴淋系

统容易增加温度控制设备,以达到提高堆浸化学反应温度的目的。滴淋系统自动化程度高,操作容易,生产效率高,可靠性高,对环境影响较小,生产成本相对较低。图4-6是滴淋系统工艺流程示意图。

滴淋方法具有以下特点:

(1) 布液系统可以与加热系统集成在一起。

为解决难处理金矿石选冶,焙烧是难处理金矿石的最古老而传统的预处理方法。焙烧工艺的优点是适应性相对较强(可处理含碳质的难浸金矿),操作费用相对较低。该工艺的缺点是对操作参数和给料成分变化比较敏感,容易造成过烧或欠烧,欠烧时矿石中的含硫和含砷矿物分解不充分,过烧时焙砂出现局部灼烧使焙砂的孔隙被封闭,从而导致金的浸出率下降。再者焙烧时会产生二氧化硫和三氧化二砷,综合回收不利时,会严重污染大气与环境。从目前来看随着环保要求越来越严格,与工艺相配套的烟气治理成本将会大幅度提高。

在建立滴淋系统的同时,可考虑通过滴淋系统增加加热设备,这样将使滴淋方法得到一定的完善和发展,最近几年国外的研究机构正在开发研究更加有效的加热湿法技术,虽然目前均还处于试验研究阶段,但加热湿法技术工艺等已显示出了良好的工业应用前景。

(2) 可以精确控制输送浸金液体

滴淋的管网压力比喷淋低得多,溶液成分损失少,可以精确地计算和控制对矿粉堆的施用量,特别是采用自动控制系统后,对溶液浓度和流量控制更加精确。

(3) 有效利用浸金氰化物和降低能耗

滴淋系统避免了溶液分布过程中的耗散损失,可以精确地定量输送浸金溶液到矿粉堆中,从而达到减少溶液使用量和降低循环系统消耗的能量。

(4) 无板结和积水

采用滴淋技术可以彻底消除矿粉堆表面容易生成板结和积水的现象,彻底解决入渗难题,提高出金率。

国际先进的滴淋系统和控制系统应具有良好的灵活性,可以应用于一个堆浸作业,也可以用于多个矿堆组成的较大型的堆浸作业。其控制系统一般由以下一些设备组成:

① 计算机控制系统(有线或无线);

② 基于 pH 和 NaCN 浓度水平的金矿粉堆控制及溶液配比控制系统;

③ 滴淋配水系统,采用矿业系统专用的滴管(图4-7)。

图4-8为滴淋系统应用实例。

滴淋系统节约浸金溶液的性能优越,浸金溶液的利用率可达98%。

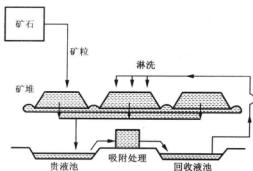


图4-6 滴淋系统工艺流程示意图

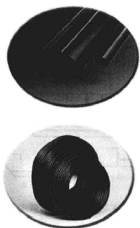


图 4-7 滴淋用管材



图 4-8 滴淋系统应用实例

4.2.5 工程应用

堆浸法采金无论在国外还是国内都有很多具体应用的工程实例。图 4-9 是一般金矿堆浸法生产的流程示意图。

金矿堆浸法工艺流程包括以下一些关键性子系统：

- ①矿石开采和破碎处理系统；
- ②浸场建设和待浸矿堆筑堆系统；
- ③溶浸剂制备系统；
- ④溶浸剂导入系统；
- ⑤浸出液储存、输运系统；
- ⑥金属提取系统；
- ⑦环境保护系统。

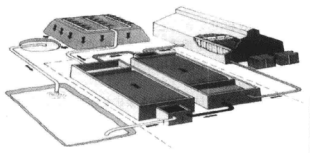


图 4-9 金矿堆浸法生产流程示意图

美国是世界上用堆浸法提取黄金最早也是最多的国家，目前仅内华达州就有 40 多个堆浸厂。堆浸产金量占全国金总产量的 60% 以上。澳大利亚、法国、加拿大、巴西、智利、墨西哥、南非、尼日尔、赞比亚等国家在金、铀、铜等矿的堆浸生产方面均有很大发展。澳大利亚纽蒙特 (Newmont) 矿业公司大力推行低品位金矿石的堆浸和难浸金矿石的细菌氧化堆浸技术，公司从采矿、试验到黄金堆浸都采用现代化大规模生产方式，年产黄金达 120 t。

譬如，美国的 Smoky Valley 金矿在 1977 年就开始了堆浸法生产金。

矿物组成简单，属易处理矿石。矿石储量 1.65 亿 t，含金品位为 1.21 ~ 1.33 g/t。金以金银矿形式存在，通常金含量占 65%，银含量占 35%，尚含少量汞、砷和其他碱金属。矿床

有65%的矿石为氧化矿,其余为不完全氧化矿与硫化矿的混合矿,以及含有单体金的硫化矿和含金黄铁矿。金粒度的变化在不同的矿带区各不相同,致密熔岩区域从6.35 mm到5 μm ;贫熔带则从3.17 mm到2 μm 。

矿床采用露天开采,用传统的凿岩爆破采矿。采下的矿石送往破碎车间加工,经三段破碎处理后,使矿石粒度达到堆浸要求。第一段筛下产品-9.5 mm;第二段破碎机排矿粒度为-50.8 mm;第三段筛上产品大于38.1 mm。

矿石在被送往装仓前加入未加工的生石灰(1.36 kg/t 矿石),并在带式输送机输送过程中喷水,使矿石和石灰的混合基本均匀,符合浸出要求。

浸垫总长960 m,宽84 m,沥青面厚178 mm,浸垫向集液沟倾斜4%。浸垫被分成30个部分,每部分用一条直径76.2 mm的供液管供液。

筑堆时,先将大于38.1 mm的矿石铺盖在浸垫表面,既能防止大型设备对浸垫的破坏,又有助于浸出液的排放。在推土机的帮助下将矿石堆成平均高度为10.5 m的浸堆。

在矿堆顶部用摇摆喷淋器的50.8 mm的硬质聚乙烯塑料管,在半径7.5 m的范围内喷淋。

浸液液的氰化钠浓度为0.45 kg/t,喷淋强度0.17 L/(min·m²),每一个部分的溶浸时间约为55 d。与此同时,每周停止浸出三个部分并排放富液、洗涤和拆堆。

浸出富液用活性炭吸附金,在加热加压条件下解吸载金炭,其解吸液便成为适合给入电解槽的高品位富液。

在电解槽中金被电解沉淀在阴极钢丝棉上,用火法熔炼阴极钢丝棉除去铁和其他杂质,最终产品为合质金,其含金量为65%,含银量为35%。合质金在精炼厂进一步提炼成适合销售的纯度后即可投入市场。

此外,美国的 Mesquite 金矿也进行了金矿的堆浸生产。该矿在堆浸生产过程中,为了改善矿石的堆浸条件,增加了破碎后的矿石经过制团再堆浸的流程。制团设备由两条带有喷洒系统的皮带组成,该喷洒系统安装在排料槽内。当由带式输送机运来的矿石排卸到第一条制团皮带时,由贫液池泵送来的贫液即喷洒到矿石上;当经过第一制团皮带上的矿石向第二条皮带卸载时,排料槽内的喷洒器再一次将矿石喷湿。由第二条制团带排出的矿石排入倾斜输送带,转入卡车装料斗,然后由卡车运往堆浸场筑堆。

还有,加拿大也有矿山进行过金矿堆浸生产。该矿金矿石储量达185 000~750 000 t,平均金品位3.4 g/t。矿石的孔隙度和渗透性均表明适于堆浸,且矿石系硅质片状岩石,含泥量少,无需制团处理。

露天采出的矿石经二次破碎至13 mm后,按1.5 kg/t的比例往矿石上加石灰,并由32 t卡车运送到78×108 m的浸垫上筑堆。

为防止矿石棱角刺破垫衬造成富液流失,在聚氯乙烯浸垫垫衬上,先铺一层200~250 mm厚的砂子,再铺一层150~200 mm厚的砾石。

在浸垫两侧挖掘宽3~6 m的集液沟,直通993 m³的富液池,接着是584 m³的贫液池,最后设置了1 380 m³的防洪池。集液沟、富液池和贫液池均以聚氯乙烯衬底。

筑堆由前端式装载机分三层筑堆:第一层矿石32 000 t;第二层矿石30 000 t;第三层矿石27 000 t,堆高5 m。

溶剂剂为成本较NaCN低的Ca(CN)₂。初期浸出液含金浓度较低,继续返回矿堆喷淋,

当浸出液中含金浓度达 3.85 g/t 时送去富液池。浸出周期为 30 ~ 60 d, 金回收率约 65% ~ 70%。

用锌置换法回收含金溶液中的金。具体做法是, 浸出富液经过澄清除去所有固体杂质, 后经脱氧塔浸入锌粉置换装置, 加入锌粉, 富液中的金即呈细粒固体沉淀, 然后通过压滤机捕集金沉淀物。贫液则通过离子交换, 由两个柱中的离子交换树脂吸附捕集氰化物和贱金属, 然后从树脂上解吸氰化物和贱金属。不仅回路中的氰化物可以再使用, 而且除去了污染环境金属离子的尾液可以排弃, 可节约大量费用。

已滤金泥通过两次熔炼: 第一次熔炼除去炉渣(包括锌)获得金锭; 第二次熔炼除去铜, 获得含金 65%、含银 35% 的合金锭。

中国在 20 世纪 70 年代也开始引进和研究堆浸技术提金。堆浸采金技术工艺简单、操作容易, 投资少, 见效快。首先在辽宁省丹东虎山金矿进行小规模试验性生产, 试验成功后, 相继在河南灵湖、银洞坡, 云南墨江, 河北崇礼, 内蒙古赤峰等地金矿推广应用, 均取得满意效果, 为我国低品位含金氧化矿的开发利用开辟了道路。1981 年, 中国低品位金矿石的堆浸技术通过生产鉴定, 随后在河南、河北、辽宁、湖南等省迅速发展, 到 1990 年全国已有 80 余个堆浸矿山。我国的经验表明, 原矿品位高于 3 g/t 的矿石不应该采用堆浸法, 否则就成为一种浪费资源的做法。据有关专家的统计资料, 我国采用堆浸法每年生产的黄金在万两以上(仅河南省堆浸生产的黄金累计产量已达 1.3 万两)。

金矿床在全国各省均有分布。但具工业规模的金矿床主要分布在我国中部、西部和北部地区, 以及近年新发现的成矿带。在已探明的黄金储量中, 有 30% 为难处理金矿。据有关机构不完全统计, 我国难处理金矿远景储量达 1 000 多 t, 已探明的储量中有 700 t 的含砷、硫金矿难以直接氧化, 至少有 40 个以上储量为 1 ~ 100 t 难处理金矿因环境问题而无法开发利用。因此, 随着易采矿床的大量开采, 难处理金矿资源的开发利用已成为黄金开采的一项重要任务, 溶浸采金技术势必会在该领域发挥越来越重要的作用。

为了提高利用难处理金矿的技术能力, 解决矿山企业节水、降低能耗等问题, 在我国的黄金生产中引进国际先进高效、环保的溶浸法采金的滴淋作业系统十分必要。在环境保护方面要提高环保意识, 积极推行清洁生产工艺, 搞好综合利用, 企业“三废”排放必须达到国家或地方规定标准。有条件的大中型黄金企业积极创建“园林式企业”和“零排放矿山”, 创造更优美的生产环境。

此外, 据统计资料我国品位在 0.5 g/t 以上的含金尾矿资源达 10 亿 t 之多, 金金属量为 500 t。随着预处理技术与尾矿堆浸技术的综合应用, 我国对黄金尾矿资源的二次开发利用也将进入新阶段。资源二次开发是当代世界矿业的一个重要课题, 从 20 世纪 90 年代开始, 我国即着手采用堆浸技术处理低品位尾矿资源, 并进行了成功的尝试。从 2001 年开始, 超低品位堆浸技术以其投资少、成本低、易实施的特点, 迅速在我国尾矿资源丰富的小秦岭地区及四川、青海、甘肃、新疆、陕西、内蒙古等西部地区得到大力推广, 2004 年资源利用量已经达到百万吨以上, 一个新的尾矿开发高潮悄然形成。

河北崇礼县席麻湾金矿进行了黄金堆浸生产。该矿金矿石储量 450 万 t 以上, 最高金品位 280 g/t, 平均 3 ~ 5 g/t, 金金属达 15 t。含金矿石多为氧化矿, 金属矿物主要为褐铁矿、黄钾铁矾及少量黄铁矿和铅锌矿。自然金在矿石中有的呈细小不规则的形状, 有的呈大粒明金, 主要分布在褐铁矿和黄钾铁矾中。

该矿采用矿石氧化堆浸—活性炭吸附工艺(图4-10)。

采出矿石运送到堆浸场筑堆之前,需先破碎至25~30 mm。

浸垫是在建好的堆浸台上铺两层聚乙烯塑料薄膜,并在其上垫一层油毡纸。然后在其上铺一层厚度为30 mm的大块矿石,再将破碎好的矿石与粉矿按比例分层筑堆,筑堆高度1.6~2.5 m,堆成长方形。

在筑好的矿堆上,先用清水洗涤除泥,并将污水排弃,然后用石灰水淋洗处理,直到pH达到9~11为止。如果pH达不到9~11,可加入部分NaOH。碱处理时间一般为4~5 d。

溶剂采用氰化钠。用管道将氰化钠和氧化钙混合液输送到矿堆上,用淋浴喷头喷淋。为了使矿堆内有足够的氧气,采用间歇喷淋,浸出周期约为47 d。

浸出富液用活性炭吸附金。

矿石堆浸结束后,采用清水洗涤。第一次的洗涤水,可作溶浸液返回其他矿堆喷淋;第二次以后的洗涤水可加入漂白粉,并在废石堆表面也洒漂白粉进行洗涤,以消除残余的氰化物,待达到国家规定的排放标准(0.05 mg/L)时,将废石堆拆除排弃到废石场。

2006年6月国内相关新闻报道了目前为止国内最大黄金堆浸矿山已开工建设——由宁夏核工业地质勘察院与加拿大金山矿业公司合资合作的内蒙古新忽热217金矿长山壕堆浸场底垫工程及其辅助工程。工程完工后,日处理低品位金矿石量2万t,在内蒙古地区可实现冬季生产,将成为我国规模最大、技术最先进的黄金堆浸生产矿山。

宁夏核勘院原为核工业217大队,217金矿是核勘院按照“立足区内作贡献,走出宁夏做地勘,依托地勘求发展”的经济发展新理念,经过14年的艰苦勘探发现的一个低品位大型岩金矿床。金矿带主要分布在白云鄂博群比鲁特岩组下段,区内地层为多金属含矿层位,地层金丰度值高,金以粒金形式及微细金、裂隙金形式存在,属低品位、大矿量、难选冶类型,符合《国务院关于利用境外资金开采低品位、难选冶金资源问题的批复》要求。根据该矿主要呈粒金形式存在的特点,经柱浸试验证实:该矿适宜于采用堆浸法提金,最低入堆品位为 0.28×10^{-6} ,不仅有利于金资源的合理开发利用,也使我国的堆浸黄金生产技术达到世界先进水平。

为了加快对该矿床的开发,宁夏核勘院采取合作引资进行风险勘探的办法,2002年与加拿大金山矿业公司合作成立了宁夏太平矿业有限公司,已先后投入资金近1亿元进行详勘。现已在东西长约8 km、南北宽约2 km的矿区范围内圈定可露天开采的金矿体35个,平均厚度3~15 m,金平均品位 0.823×10^{-6} 。217金矿前期可采金属储量为40 t,年计划生产黄金4 t,预计生产期为10年,年销售收入平均为4亿元。

目前矿山已进入工业化生产准备阶段,长山壕堆浸场底垫工程就是该矿工业化生产的核心工程。据介绍,此项工程项目合同总金额为1400余万元,工程包括堆浸场土方、场地

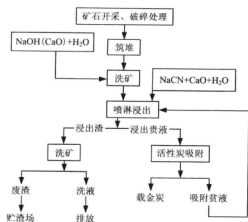


图4-10 麻湾金矿堆浸提金工艺流程

平整夯实、底垫膜上碎石铺设及 PVC 管线购置和铺设工作,同时完成下脚料的外运至指定地点、矿区 20 余 km 网围栏工程、3 台配套锅炉制造及安装工程等工作。

4.3 金属铀的浸出

铀的化学活性高,是一种非常活泼的元素。它几乎能与所有的非金属作用,也可与金属生成金属互化物。它也能与许多酸、碱、盐起反应。一般认为铀存在三价、四价、五价、六价四种价态。三价铀呈紫红色,非常不稳定,极易氧化。五价铀只有学术上的意义,因为它在水溶液中发生歧化反应,故常见的只有四价和六价铀离子和化合物。四价铀呈蓝绿色,较稳定,但也易氧化,只有在还原性介质中能稳定存在。六价铀最稳定,呈黄绿色,除非有还原剂存在,否则六价铀能稳定地存在于溶液、固相或气相中。但在天然铀矿物中,铀多以四价形式存在,如沥青铀矿等。而在浸出及转化工艺中,绝大部分工序又要利用六价铀的特性,故四价和六价铀对堆浸生产和研究有着重要价值。铀常有多种氧化态存在,已发现的有 U(III)、U(IV)、U(V) 和 U(VI) 四种。铀的主要化合物有硫酸铀 $[U(SO_4)_2]$ 、硫酸铀酰 $[UO_2SO_4]$ 、碳酸铀酰 $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ 和重铀酸盐 $[U_2O_7]^{2-}$ 。

4.3.1 溶浸采铀的基本原理

铀矿开采与其他金属矿的开采基本相同,大致可分为露天开采、地下开采和溶浸法三种。铀矿床的特点是矿体形态复杂,面积和厚度小,多数在压碎带、破碎带、剪切和强力裂隙中赋存,造成开掘和支护复杂化。铀又与其他金属共生,形成复合矿,采矿时要考虑综合利用。铀矿物和铀矿石具有放射性,在开采过程中必须要有预防氡气和放射性微尘的设备,保护工作者的人身安全。由于溶浸采矿法具有特定的优越性,近年来在铀矿开采实践中越来越受到重视。

根据溶浸法开采铀矿的工艺不同,又将它分为堆浸和地浸两种方法。其基本原理是将溶剂喷洒或注入到矿石中,有选择性溶解矿石中的有用组分,再将溶液抽出处理。该法也称化学采矿。地浸采铀对铀矿种有特殊要求,以砂岩矿为好。图 4-11 是国内某溶浸采铀矿山地面设施照片。



图 4-11 国内某溶浸采铀矿山地面设施

4.3.2 溶浸采铀的基本工艺流程

溶浸采铀(矿)过程包括矿物浸出和金属铀提取两个基本过程(图4-12)。

4.3.3 铀的浸出

用溶浸液将矿石中有用组分选择性地溶解到溶液中的过程,称为浸出过程。它是一个物理化学过程,即由物理扩散和化学反应两个过程组成。溶浸液将矿物溶解,使金属离子稳定在溶液中。其中的物理化学问题是复杂的,主要是反应平衡与反应速度问题;前者属浸出过程的热力学,后者属浸出中的动力学。浸出对溶浸而言,浸出速度由物理扩散速度控制的较多。

溶浸液欲与铀氧化物发生化学反应,它必须具备两个条件:一是要具有一定的氧化-还原电位,使低价铀氧化成高价铀;二是要具有一定的酸度(当用酸法浸出时),即溶液中反应物和生成物的浓度是随电极电位和酸度而变化的。

按溶浸液的性质分为酸法浸出和碱法浸出两种。前者适用于硅酸盐类的矿石,常用的溶浸剂为硫酸;后者适用于碳酸盐类矿石,常用的溶浸剂为碳酸氢钠和碳酸钠的混合溶液。

按浸出工艺和方法分为原地浸出、就地破碎浸出、堆浸和联合浸出等。

在工业生产中采用哪种方法,当然要根据试验最终结果来确定,主要考虑以下几点:

①矿石性质,如渗透性、块度、泥含量、硅酸盐含量、碳酸盐含量、硫化物含量、有用组分在矿石中的分布特点、矿石浸出性能等。

②浸矿剂价格要低,易于生产和获得。

③浸出液便于后续工序处理。

④工艺溶液能循环使用和再生。

⑤浸出率和生产率高。

⑥对环境污染小,浸出结束后易于地下水复原和恢复生态平衡。

(1)酸法浸出铀的化学过程

酸法浸出铀矿石,硫酸、硝酸、盐酸都可以作为浸矿剂,但工业上绝大多数使用硫酸浸出铀矿石,这是因为硫酸不仅有较强的浸出能力,与铀反应生成稳定的硫酸铀酰络离子,而且具有价格低、运输方便、腐蚀性较小、浸出液便于后续工序处理等优点,所以在工业上广泛应用。

用硫酸浸出铀矿石时,由于四价铀浸出较难,浸出过程中需要先把四价铀氧化为六价铀,而铀矿石中四价铀往往占有一定比例,所以在铀矿的浸出工艺中往往需要加入氧化剂。

杂质:二氧化硅、铁氧化物、氧化铝、钙镁化合物、磷酸盐、钼、钒等。

(2)碱法浸出

常用的溶浸剂为碳酸氢钠和碳酸钠的混合溶液,能选择性地溶解矿石中铀的氧化物。

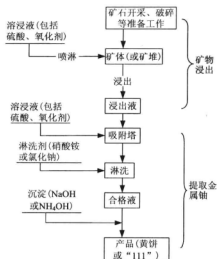


图4-12 溶浸采铀(矿)工艺流程

碱法浸出中的杂质浸出:

碱法浸出是利用铀酰离子与碳酸根的强络合作用,浸出过程中对铀有较好的选择性,杂质转入浸出液中的较少。

酸法浸出可用硫酸、硝酸和盐酸。盐酸价格高,对设备、材料等腐蚀性很强,故一般不用,硝酸氧化性强,浸出四价铀时不需另加氧化剂,对铀溶解能力大,但价格较高,且稀硝酸对浸出设备和材料要求很严,特别是在地浸中应用,井孔内设施一旦遭到腐蚀和破坏,维修和恢复十分困难,甚至引起钻孔报废,故一般很少使用。硫酸则如前所述,是一种优点较多的较为理想的浸矿剂。浓硫酸可用碳素钢容器转运和储存,浸矿设备和材料可用不锈钢、耐酸陶瓷和塑料等制造。前苏联主要用酸法,我国目前也以酸法为主。

(3) 浸出过程

- ①外扩散过程——溶浸液从溶液主体(相对于矿石颗粒表面的液膜而言)经过液膜表面对流扩散和通过液膜内的分子扩散抵达颗粒表面。(溶浸液从液体到固体颗粒表面)
- ②内扩散过程——溶浸液从颗粒的外表面通过颗粒的毛细孔和裂隙以分子扩散到颗粒内表面。(溶浸液从固体颗粒外表面到内表面)
- ③化学反应过程——扩散到内表面上的溶浸液与铀金属发生化学反应,同时生成反应生成物。此过程包括化学变化和固相变化。(化学反应)
- ④内扩散过程——生成物从颗粒的内表面扩散到外表面散过程——生成物从颗粒外表面扩散到外表面。(溶浸液从固体颗粒内表面到外表面)
- ⑤外扩散——生成物从颗粒外表面扩散到溶液主体。

(4) 影响浸出速度的因素

物理因素——矿石块度、矿石内部结构;

化学因素——酸(碱)浓度、氧化剂、温度。

4.3.4 铀的提取

铀在水溶液中通常呈铀酰离子(UO_2^{2+})状态存在,它能与多种阴离子结合成多种铀络合离子和络合物。在硫酸浸出液中,有主要以硫酸铀酰形式存在;在碳酸盐浸出液中,铀的存在形式以碳酸铀酰形式存在。

从铀的浸出液中提取铀的方法有化学沉淀法、离子交换法和有机溶剂萃取法。化学沉淀法存在生产工序多,工艺复杂,生产效率低,化学试剂和材料消耗量大,回收率低及化学浓缩物中铀含量不高(一般20%~40%)等缺点,目前除处理碱浸液尚有应用外,工业生产中已被离子交换法和有机溶剂萃取法所代替,这两种方法技术是经济而有效的,并成为标准工艺。

两种提取方法的选择原则是:一是浸出液中铀浓度的高低;二是浸出液的性质,即是清液还是矿浆。对于浓度低的矿浆宜用离子交换法。因在这种情况下若用萃取法,萃取剂损耗量大,且矿浆中固体颗粒对萃取剂有吸附作用,增加有机相损失。而离子交换法既适用于清液,也适用于矿浆,对地浸的浸出液中铀浓度低的条件尤为适用。

若从浸出液中生产铀的核纯产品,特别是对铀浓度低和杂质含量少的浸出液,首先用离子交换法富集和初步纯化,然后再用萃取法进一步提取纯化。此处推荐的淋萃流程所得铀产品纯度高,使用淋洗剂和反萃取剂理论消耗为零,吸附尾液可以循环使用,产品成本较低,

是一个很好的工艺流程。

(1) 离子交换树脂吸附机理

用硫酸浸出时,硫酸浸出液中的阴离子,除铀酰络离子外,还有硫酸根、硫酸氢根及钼、磷、砷、铁、钒等络合阴离子,这些阴离子都有可能被树脂吸附,但这些阴离子除钼以外,对树脂的亲合力都比铀酰络离子小,所以,在吸附过程中得到分离。在浸出液中还含有大量阳离子杂质如 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} 等,当用 201 × 7 型阴离子交换树脂吸附铀时,这些离子不被吸附,只要控制得好,对铀的吸附影响不大。

201 × 7 型阴离子交换树脂吸附硫酸浸出液中的铀的反应式为:



式中: X——树脂上的可交换离子,如 NO_3^- , Cl^- 。

碳酸盐浸出液中,铀主要以铀酰离子形式存在,仍然可用 201 × 7 型阴离子交换树脂吸附其中的铀,反应式中的硫酸根变为碳酸根。

树脂上的阴离子和浸出液中的铀酰络合阴离子是以化学当量进行交换的反应,且是可逆的。当交换达到动态平衡时,则从浸出液进入树脂和从树脂转入浸出液的铀酰络合阴离子的量相等,此时认为树脂吸附达到饱和。达到饱和的树脂,用淋洗剂进行淋洗和转型,树脂又恢复吸附能力。

在酸性浸出液中影响树脂吸附能力的有以下 6 个因素:

① 硫酸浓度和 pH。

随着溶液浓度增加,树脂吸附铀容量下降,主要是 HSO_4^- 竞争的结果。工艺过程对 pH 控制在 2 左右为宜。

② 铀浓度。

随着铀浓度的增加,树脂吸附容量也增加,但浓度过高,不宜用树脂离子交换法。

③ 铁的含量。

铁在浸出液中以 $Fe(II)$ 或 $Fe(III)$ 存在, $Fe(II)$ 不被吸附,而 $Fe(III)$ 形成硫酸盐络合阴离子,其先被树脂吸附,后逐渐被铀置换,故铁的存在对铀的吸附影响不大。

④ 钼的影响。

在硫酸溶液中,钼可形成络合阴离子或钼酸根离子;容易被阴离子交换树脂吸附,使树脂吸附铀的容量下降。

⑤ 氯根和硝酸根的影响。

氯根和硝酸根对树脂有很强的亲和力,占据交换基团,还可以与铀酰离子生成阳离子和中性络合物,从而降低溶液中可吸附的硫酸铀酰阴离子络合物的浓度。

⑥ 温度的影响。

提高浸出液吸附时的温度,可加强铀络合阴离子扩散到树脂内部,对吸附有利,但温度不宜过高,否则影响树脂的热稳定性。一般不宜超过 50°C 。

碱性溶液中影响树脂吸附能力的有以下四个因素:

① 铀和碳酸根及碳酸氢根的相对浓度:因为碳酸氢根浓度增大时,生成铀阴离子络合物的倾向减弱,而且碳酸氢根离子也会与铀的吸附竞争,从而降低了铀的吸附。

② pH: 吸附浸出液的 pH 从 10.0 变到 9.0 时,铀的吸附容量下降 50% 以上。

③氯根、硝酸根的存在将会降低铀的吸附容量,当淋洗剂含有这两种离子时,应严格控制它们的含量。

④有机质(有机酸钠)能使树脂中毒。

(2) 清液吸附

在铀生产工艺上,用强阴离子交换树脂吸附铀时,根据树脂与吸附液的运动状态,清液吸附分为固定床吸附和连续逆流吸附(流化床)。

固定床吸附由吸附、洗涤、淋洗、脱淋及转型等工序组成,而连续逆流吸附(流化床)包括吸附和淋洗两个主要工序。

(3) 萃取法

有机溶剂萃取法由萃取和反萃两个基本工序组成。

4.3.5 工程应用

(1) Clay West 铀矿原地浸出生产

该矿位于美国德州,年产 U_3O_8 前期为 112.5 t,后期为 450 t。

铀矿层平均埋深 116 ~ 150 m,平均厚度为 10 m。含矿砂岩结构疏松。矿石平均品位 0.1%,主要铀矿物是沥青铀矿和水硅铀矿,共生矿物有硒和钼。

整个矿区划分为 4 个井田,每个井田平均有 550 个钻孔,其中 250 个为注液孔,150 个为抽液孔,余下的为观测孔。每组钻孔布置成方形,边长 23.33 m,中心为抽液孔,四个角点为注液孔。

各种钻孔的结构基本相同,孔深超过矿体底板。在注液孔和观测孔内装有内径为 100 mm 的聚氯乙烯塑料套管,在抽液孔内的则是内径为 150 mm 的聚氯乙烯塑料套管,正对矿层部分的是过滤管。在孔壁和套管之间的空隙灌注水泥浆。为防止水泥浆进入过滤管和矿层,在过滤管之上有一带石膏塞的接头,水泥浆通过石膏塞上方的排浆孔进入套管外的空隙,排浆孔下面的垫圈可防止水泥浆下漏。为了保护过滤管,套管上带有 3 ~ 4 个中心定向器,以扶正套管在孔内的位置。

溶浸初期采用碳酸铵、碳酸氢铵和过氧化氢配制溶浸液,后来换成碳酸钠、碳酸氢钠和氧气,溶浸液中氧的含量为 300 ~ 400 mg/L, pH 为 9 左右。

用耐腐蚀的泵压入溶浸液,注入压力为 1.5 MPa 左右;用 2.24 ~ 6 kW 的不锈钢泵,从钻孔抽出浸出富液,并用直径为 50 ~ 60 mm 的不锈钢管或玻璃纤维管输送到富液贮存池。每升抽出液中含 U_3O_8 为 20 ~ 30 mg。

浸出液用离子交换树脂吸附,用 NaCl(加 Na_2CO_3)作淋洗液将铀从树脂上淋洗下来,用 NH_3 从被淋洗下来的高浓度含铀溶液中沉淀铀(重铀酸铵)。最终产品为粉状黄饼。废渣通过钻孔注入深部地层埋藏。

(2) 新疆某铀矿床

该矿距县城 52 km,到伊宁市 70 km,矿区到最近火车站(河)350 km。当地气候属大陆半干旱气候,年降雨量 300 mm,年蒸发量为 2 500 ~ 3 500 mm,年平均气温 8.4℃,7 月份平均气温 34℃,1 月份平均气温 -27℃,年最高气温 42℃,最低气温 -39℃,日温变化大。严冬期为 11 月至翌年 3 月,最大积雪厚度为 1 m,最大冻土深度为 1.2 m。全年无霜期为 150 d。

矿床位于伊犁盆地南缘,为中—新生代陆相山间拗陷盆地,盆地为中上古生代地层,矿区内均为第四系覆盖。组成矿石的各种岩性以各种粒级砂岩、含砾砂岩为主。矿石矿物组成主要为石英(30%~45%)、长石(1%~16%),其次为火山岩、变质岩屑(20%~35%)及少量云母、绿泥石(1%~5%),胶结疏松,为孔隙式胶结类型。

铀在矿石中以分散吸附状态存在为主,次为沥青铀矿、铀黑及铀的有机络合物。

矿石为高硅、低钙镁类硅酸盐矿石,其化学成分见表4-1。

表4-1 矿石化学成分表

组分	U	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	其他
含量(%)	0.14	87.26	8.04	0.96	0.54	0.84	0.59	0.11	1.83	5.27

据分析,矿石中的CaCO₃含量为0.036%~0.071%。

根据中间性储量报告,3-13#勘探线B+C+D级工业储量为584.7 t。矿体平均平方米铀量为4.71 kg/m²。矿体平均倾角为10°左右,平均厚度4.8 m,最大厚度9.7 m,平均品位0.052%,最高达0.149%。矿体埋深104~126 m。

矿床水文地质条件:含矿含水层为第五含水层,厚度为10~25 m,沟低10~16 m,为承压水,含矿含水层为中粗粒砂岩、含砾砂岩等,胶结性能差,透水性能好,渗透系数0.31~1.58 m/d,地下水类型为硫酸重碳酸型,矿化质为0.66~1.05 g/l, pH=7.5~8.0,水温15℃左右。

主要工程及设施:试验开始定为10 t/a规模,后来施工中发现矿体情况好,临时决定扩大到20 t/a规模,共施工试验钻孔39个。其中:注孔20个,抽孔14个,观测孔5个。(抽注孔交换使用)

主要工程量详见表4-2:

表4-2 扩大试验主要工程量表

序号	工程名称	单位	工程量
1	钻孔	m	6 050.86
2	抽注液管道安装	m	3 350
3	集液池 136 m ³ /个	m ³	272
4	吸附高位槽 $\phi 2.7 \text{ m} \times 2.7 \text{ m}$	m ³	31.0
5	配液间 $\phi 2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$	m ²	40.0
6	吸附车间 $\phi 2.0 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$	m ²	176.0
7	中和沉淀车间	m ²	201.0
8	发电房	m ²	170.0
9	机修车间	m ²	60.0
10	工业水塔	m ³	150.0

主要设备、设施见表 4-3。

试验：

①钻孔工程：钻孔为方格网状布置 25 m × 25 m，钻孔结构为裸眼式，抽注孔交换使用。

②溶浸液配方及使用：

溶浸液为 H_2SO_4 ，酸化期为 25 天，pH 控制在 2 左右，共浸出金属 6 528.85 kg。

③溶浸范围控制：

a. 本矿属荒漠地区，无人烟；

b. 抽 > 注 3% ~ 5%，尾液中和外排。

试验效果：

投资少(240 万元)、见效快(先年 4 月施工，第二年 6 月正式试运行)。单孔抽液平均 5.6 m³/h，年产量连续 5 年达到设计规模，年利润 1 000 多万元。

表 4-3 扩大试验主要设备、设施表

序号	名称	规格型号	单位	数量
1	钻机	XU-1000	台	2
2	钻机	XJ-300	台	1
3	泥浆泵	WB-250	台	3
4	空压机	4U-1.01/10	台	6
5	空压机	W-0.9/7	台	7
6	耐酸泵	F80-97	台	2
7	柴油发电机	TX1M2-TH	台	3
8	柴油发电机	TZS-TH	台	1
9	吸附高位槽	φ2.7 m × 2.7 m	个	2
10	配液槽	φ2.5 m × 2.5 m	个	2
11	吸附塔	φ2.0 m × 4.5 m	个	5
12	板框压滤机	52 m ²	台	1
13	浓密机	φ3.6 m × 1.8 m	台	1
14	化验室		间	2
15	工业水塔	150 m ³	个	1
16	机修车间	60 m ²	间	1

第5章 海洋开采理论与技术

5.1 概述

5.1.1 海洋与人类

在讨论海洋开采理论与技术之前,有必要先了解一下海洋。如果光从面积来看,海洋占地球表面积的71%,达3.62亿 km^2 ,它蕴含着5.12亿 m^3 的海水,平均深度为3.7 km 。地球上计有四大洋:太平洋、大西洋、印度洋和北冰洋。归属于不同洋的海和湾共计有60个之多(表5-1)。

表5-1 地球上的洋及其所属的海、湾

洋	所属海、湾
太平洋	渤海、黄海、东海、南海、杭州湾、北部湾、白令海、鄂霍次克海、日本海、濠户内海、菲律宾海、爪哇海、苏禄海、苏拉威西海、塔斯曼海、马鲁古海、斯兰海、阿蒙森海、别林斯商普海等共26个
大西洋	波罗的海、加勒比海、地中海、北海、黑海、里海、亚速海、马尔马拉海、威德尔海、墨西哥湾、哈德逊湾、比斯开湾、几内亚湾、巴芬湾等共15个
印度洋	红海、阿拉伯海、安达曼海、萨武海、帝汶海、阿拉弗拉海、波斯湾、孟加拉湾、大澳大利亚湾等共10个
北冰洋	格陵兰海、挪威海、巴伦支海、白海、喀拉海、拉普捷夫海、波弗特海等,共9个

当人们谈及海洋时,首先映入脑海的肯定是那一望无际的蓝色的海水和自由自在生活在水中色彩斑斓的鱼类(图5-1)。

其实,海洋远不是这么简单,它对人类的影响正随着科学技术的发展进步而逐步扩大。人类对海洋的索求也不再仅仅局限在捕鱼、航行等领域。海洋所蕴藏的巨大海水化学资源、海洋生物资源、海洋动力资源以及海洋矿产资源早就引起人们的极大关注,并不断激励着人们走向海洋、



图5-1 美丽的大海

开发海洋、利用海洋的极大决心和热情。当然,人类从未停止过探索无穷未知世界,包括海洋的步伐。尤其20世纪以来,人类对宇宙和深海探索的步伐更大大加快了。

今天,人类的活动范围上至苍穹已可达1 000 km,下达大海深处也可达10 km。虽然万

米海底仅仅是地球直径(约 12 000 km)的十二万分之一,但终究是人类走向大海深处的坚实基础和开始。

相对而言,人类向深海进军的步伐似乎迟缓了一些。这是由于阳光无法到达深海海底,又因深海海底的水压达到数十兆帕(数百个大气压),因而人类迈向深度仅为 10 km 的深海海底的步伐竟比迈向无垠太空的脚步要沉重得多。

当然,人类对海洋的探索和研究也并非停滞不前。早在 1960 年,一个名为“Trieste”的密封的球形潜水器载着两名勇敢的潜水员在太平洋的关岛附近、世界上最深的马里亚纳海沟下潜了 35 800 英尺,这标志着人类对深海的探险活动正式拉开了序幕。1995 年 3 月,一个由日本人制造的装备了自动摄像机的无人潜水器,在这个长达 2 528 km 的神秘的海沟底部探测了一小段距离,终于将海底最深处的景观第一次栩栩如生地展现在人们面前。总之,自 1960 年美国潜艇潜水深 10 916 m 成功以后,各国科学家加紧了对深海海底的科学研究,并且发现,在原先以为毫无生机的深海底部,尽管那里的水层因熔岩的高温而变得滚烫,但还生活着以热水中的硫化氢为营养物的细菌,还发现了蟹、虾类的近亲。

海底探险的最便宜、最科学的方式是用无人驾驶的自动潜水器(缩写为 Auv),Auv 能够在海底漫游长达一年,在此期间耐心地搜取各种数据。

尽管面临着经费短缺、工作艰苦甚至生命危险,深海探险在世界范围内依然方兴未艾。因为人们知道,他们在这冰冷黑暗的海底的探索活动会带来巨大的回报,这回报不仅是科学和商业的,也是心理的,人类潜入地球上的最深处和他们到达珠穆朗玛峰的理由是一样的:我们到达过这里。

然而,深海探险的巨额代价使得只有那些最富庶的国家才能承担。在这方面走在前列的是日本。日本对海底探索显得迫不及待,这是因为这个岛国的南部位于三个大陆板块的交合处,一旦这些板块彼此相撞就会发生 5 级以上的大地震,1995 年造成 5 502 人死亡的神户大地震即为一例。

尽管如此,海洋留给人类的依旧是一个充满未知的世界,正如美国海洋生物学家田西尔维·埃勒说:“有一种错误观念认为我们已经征服了海底,而真正的事实是我们关于海底的知识还不如关于火星的多。”更何况,对海底裂缝、板块的形成及活动的研究更有助于了解地震和火山活动的机制。此外,虽然深海探险是一项充满危险和困难的行动,但它所获得的却是高额回报:巨大的石油和镍、锶、钴等稀有金属矿藏;能改变我们对地球以及生命演化观念的科学发现;还有,从深海细菌、矿物和鱼类中能提炼出对付人类疾病的奇特的新药物。因此,向深海进军是人类 21 世纪的目标。

5.1.2 海、洋及海底地形

海一般邻近陆地,水深在 3 000 m 以内,盐度、水温受大陆气候影响,有季节变化,透明度小,没有独立的潮系统,潮流一般由大洋传来,涨落显著,沉积物多为沙、泥。海的面积约占海洋总面积的 11%。

洋一般远离大陆,面积广阔,水深在 2 000 ~ 3 000 m 以上,盐度、水温不受大陆气候影响,季节变化小,透明度高,有独立的潮系统和强大的洋流系统,沉积物多为深海特有的钙质软泥、硅质软泥和红黏土。洋的面积约占海洋总面积的 89%,占地球表面面积的 60% 以上。

海底形状与陆地地形一样,非常复杂。在大陆架附近的浅海,主要受海浪作用,把海底

深度不大于 200 m 的部分冲刷削平, 再把破碎的沙石或淤泥带到水深大于 200 m 的地方。其底部往往较平坦, 向海洋倾斜的角度平均不超过 11.7° 。

海浪能够直接影响的水深不超过 200 m, 这样, 海底就变得较为平坦了, 海浪还有力地冲击着海岸, 使海岸不断遭到破坏, 造成海岸的坍塌碎裂, 从而形成了砂砾。当退潮时, 这些砂砾也被潮水带到海中, 在海底较低处堆积起来。这是浅海底部较为平坦的另一个重要原因。连接大海的众多的陆上河流, 由于暴雨的冲刷, 带来了大量的泥沙。这些泥沙入海后, 在海潮的作用下, 往往冲积到浅海比较低凹的地方。此外, 浅海不处在大洋底部, 地壳较厚, 受火山、地震等地壳运动影响较小, 以及受洋流的影响较小, 也是浅海底部较为平坦的重要原因。

洋底地形在构造上包括海岭、大洋盆地和海沟三种基本的地形区域和若干独特的地形构造。可见, 大洋底部并不是一马平川, 而是山脉连绵、沟壑起伏的。

根据水深、海底坡度和海底沉积物等, 海底地形大致可分为(图 5-2):

大陆架:从海岸起, 海底向海洋缓倾到一定深度后, 海底坡度显著增大, 这个坡度较大的地区叫大陆坡, 从海岸到大陆坡之间的区域叫大陆架。大陆架紧邻陆地, 水深一般在 200 m 以内, 坡度 $1^\circ \sim 2^\circ$, 宽度几海里到几百海里。

大陆坡:大陆坡区倾斜度一般为 $4^\circ \sim 7^\circ$, 有地方达 40° 以上, 水深一般在 200 ~ 2 500 m。

大洋盆地:是海洋的主要部分, 占海洋总面积的 77.7%, 地形平坦开阔, 倾斜度为 $0.2^\circ \sim 0.4^\circ$, 深度为 2 500 ~ 6 000 m。

海沟:大洋盆地中, 深度超过 6 000 m 的地方称为海沟。海沟中深度大于 10 000 m 的地方称为海渊。

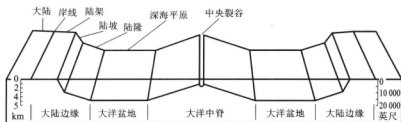


图 5-2 海底地形基本要素

洋底的地形分布虽然十分复杂(图 5-3), 但也有一定的规律。在各大洋中, 都有大略作南北走向的巨大的海底山脉, 绵延一万多千米, 在洋底东部还有一个大洋中脊; 大西洋中部也有一条纵贯南北的大西洋海岭(又称大西洋中脊), 长达 15 000 km; 印度洋中部除存在一条“人”字形的中央海岭外, 东部还有一条南北走向的长达 6 000 km 的东印度洋海岭; 北冰洋虽然较浅, 但在中部也有两条略成南北走向的海岭。

在海底山脉的两侧, 多为大洋盆地, 深度一般在 3 700 ~ 6 000 m 之间。大洋盆地中分布有孤立突兀的海台和较为平缓的海底高原。它们将整个大洋盆地分割成若干个海盆, 较大的有: 太平洋中的东北海盆和南太平洋海盆等; 印度洋中的中印度洋海盆、西澳大利亚海盆和南澳大利亚海盆等; 大西洋中的西欧海盆、佛得角海盆和巴西海盆等; 北冰洋中的南森海盆、加拿大海盆和马可波罗海盆等。

海沟是洋底最深的地方,但它一般不分布在大洋中部,而在大洋边缘,处于大洋与大陆的分界处。海沟的宽度通常只有几百千米,但深度却很大。如太平洋中的马里亚纳海沟,深达 11 034 m,就是把陆地上最高的珠穆朗玛峰(8 848.13 m)填进去,也还差 2 180 多 m 才能露出海面。大西洋中的波多黎歌海沟深达 8 648 m,也几乎与珠峰等高。因此海沟又被称为海渊,是世界上最深邃的峡谷。

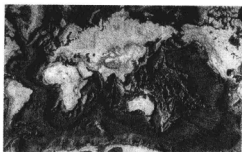


图 5-3 全球洋底地形图

5.1.3 海洋资源及其分类

海洋就是人类和多种生物的发祥地。海洋不仅提供人类巨大的食品资源,而且蕴藏着丰富的矿产资源和能源,同时也是人类生存和生活的第三空间。海洋不仅是良田,是宝库,是盛夏的别墅,是寒冬的温床,是各国关注的重要战略目标和交通要道,更是人类未来重要的陆地可接替资源,因为海洋中蕴藏着取之不尽、用之不竭的海水化学资源、动力资源、生物资源和矿产资源(表 5-2)。

在 21 世纪的今天,人们强烈意识到陆地资源的匮乏,随着社会的进步和科学水平的提高,人类将更多依赖占地球面积 3/4 的海洋。海洋是人类可持续发展的重要基地,海洋是人类未来的希望,开发利用海洋是解决当前人类社会面临的人口膨胀、资源短缺和环境恶化等一系列难题的极为可靠的途径。在陆地资源日渐枯竭的今天,海洋正成为人类繁衍发展的生命线。海洋开发利用的前景诱人,世界上许多国家视海洋为开拓地,制定面向海洋、开发海洋、向海洋进军的国策。人们开始认识到,海洋是 21 世纪确立国家地位和经济实力的决定性因素之一,发展海洋事业已成为国际性大趋势和各国的战略抉择。

表 5-2 海洋资源分类

资源类别	地质分布	开发内容	有关产业
海水化学资源	整个海洋水域	淡水 金属及盐类: 锰、钙、钾、溴、硫、铷、铯、硼等 含金属的浓盐: 水中富集有锌、铜、铅、银等	矿业、化学、电力、机械
海洋矿产资源	大陆架区(水深 0~200 m)	重砂矿物: 磁铁、钛铁、金红石、独居石、锆铁、锆石、锡石等 稀有及贵重矿物: 金刚石、金铂等 灰质砂及贝壳: 硅质砂、磷、钙石、霞石、海绿石等 建筑、玻璃制造及铸造等用的砂砾和砂 流体矿产: 石油、天然气、浓盐 海底基岩矿床: 煤、铁、硫磺、石膏等	矿业、造船、钢铁、电机、机械、电子技术、石油化工等
	大陆坡(水深 200~300 m)	磷灰石、热液硫化矿床(多金属软泥和含锌、铜、铅、银的块状矿物)	
	深海平原(水深 3 500~6 000 m)	锰结核(含锰、铜、钴、镍等)	

续表 5-2

资源类别	地质分布	开发内容	有关产业
海洋动力资源	整个海洋水域	利用热力发电 利用海水的势能和动能,如波力发电、潮流发电、海流发电等 用深层海水(压力差)进行海底钻探等	电力、土建、电机、电子技术
海洋生物资源	整个海洋水域	植物:海带、紫菜、巨藻等 动物:鱼、虾、龟、鲸、豚、贝以及其他海兽类	水产、造船、机械、电机

海水中溶解有 80 多种化学元素,被誉为“液体矿山”。海水中可提取镁、钾、铀、锶等各类矿物达 5 亿 t。海水中一些主要元素在海水中的浓度及总量见表 5-3。

表 5-3 海水中的主要元素及其含量

元素名称	海水中的浓度(g/t)	海水中的总量(t)	元素名称	海水中的浓度(g/t)	海水中的总量(t)
钠 Na	10 500	14×10^{15}	铯 Cs	0.0005	6.8 亿
镁 Mg	1 300	1.78×10^{15}	钴 Co	0.0005	6.8 亿
硫 S	885	1.19×10^{15}	铈 Sb	0.0005	6.8 亿
钙 Ca	460	6.3×10^{14}	铈 Ce	0.0004	5.5 亿
锶 Sr	8	1.1×10^{14}	钇 Y	0.0003	4.1 亿
铜 Ac	0.6	8.2×10^{12}	银 Ag	0.0003	4.1 亿
锂 Li	0.17	2.3×10^{12}	镧 La	0.0003	4.1 亿
铷 Rb	0.12	1.64×10^{12}	镉 Cd	0.0001	1.37 亿
钡 Ba	0.03	4.1×10^{11}	钨 W	0.0001	1.37 亿
铟 In	0.02	2.74×10^{11}	锗 Ge	0.00007	9600 万
锌 Ze	0.01	1.37×10^{11}	钍 Th	0.00005	6800 万
铁 Fe	0.01	1.37×10^{11}	铬 Cr	0.00005	6800 万
铝 Al	0.01	1.37×10^{11}	钪 Sc	0.00004	5500 万
钼 Mo	0.01	1.37×10^{11}	汞 Hg	0.00003	4100 万
锡 Sn	0.003	4.1×10^{10}	镓 Ga	0.00003	4100 万
铜 Cu	0.003	4.1×10^{10}	铅 Pb	0.00003	4100 万
铀 U	0.003	4.1×10^{10}	铋 Bi	0.00002	2740 万
镍 Ni	0.002	2.74×10^{10}	铊 Tl	0.00001	1370 万
钒 V	0.002	2.74×10^{10}	铌 Nb	0.00001	1370 万
锰 Mn	0.002	2.74×10^{10}	金 Au	0.000004	550 万
钛 Ti	0.001	1.37×10^{10}	铍 Be	0.0000006	82 万

海洋是个矿产聚宝盆。海洋矿产资源是指存在于海洋中在目前或将来经济技术条件下具有工业开采规模的有用矿物质。

海洋矿产资源按其形态可分为三类：海水矿产资源、液体矿产资源和固体矿产资源。

(1) 海水矿产资源

指溶解在海水中的有用矿物质和有用化学元素。海水矿物资源是海洋中种类和数量最多的海洋矿产资源，它是化工原料的主要来源。

(2) 液体矿产资源

指海洋中的石油和天然气，它是分布最广和最具经济价值的海洋矿产资源。也是目前开采最大和经济效益最好的海洋矿产资源。

(3) 固体矿产资源

指洋底或洋底内部以固态形成存在的有用矿物质。如海滨砂矿、海底表面的锰结核、富钴锰结核和含重金属的软泥矿、以及海底多金属热液矿床等。海底固体矿产资源分布范围广，种类多，是具有较大潜在经济价值的矿产资源。

5.1.4 海洋开发相关技术

要利用海洋的丰富资源，就要了解海洋和开发海洋。了解海洋需要观测海洋，海洋开发，需要获取大范围、精确的海洋环境数据，需要进行海底勘探、取样、水下施工等。要完成上述任务，需要一系列的海洋开发支撑技术，包括深海探测、深潜、海洋遥感、海洋导航等。海洋工程技术主要用以开发海洋资源、利用海洋空间、防御和减轻海洋灾害。其中，水下工程技术更是进行水下石油开采和深海采矿所必需的手段。

5.1.4.1 海洋开发相关技术概述

(1) 海水淡化技术

向海洋要淡水已成定势。淡水资源奇缺的中东地区，数十年前就把海水淡化作为获取淡水资源的有效途径。美国正在积极建造海水淡化厂，以满足人们目前与将来对淡水的需求。全世界共有近8 000座海水淡化厂，每天生产的淡水超过60亿 m^3 。最近，俄罗斯海洋学家探测查明，世界各大洋底部也拥有极为丰富的淡水资源，其蕴藏量约占海水总量的20%。这为人类解决淡水危机展示了光明的前景。

(2) 深海探测与深潜技术

深海是指深度超过6 000 m的海域。世界上深度超过6 000 m的海沟有30多处，其中的20多处位于太平洋洋底，马里亚纳海沟的深度达11 000 m，是迄今为止发现的最深的海域。深海探测，对于深海生态的研究和利用、深海矿物的开采以及深海地质结构的研究，均具有非常重要的意义。

美国是世界上最早进行深海研究和开发的国家，“阿尔文”号深潜器曾在水下4 000 m处发现了海洋生物群落，“杰逊”号机器人潜入到了6 000 m深处。1960年，美国的“迪里雅斯特”号潜水器首次潜入世界大洋中最深的海沟——马里亚纳海沟，最大潜水深度为10 916 m。

1997年，中国利用自制的无缆水下深潜机器人，进行深潜6 000 m深度的科学试验并取得成功，这标志着中国的深海开发已步入正轨。

(3) 大洋钻探技术

在漫长的地球历史中，沧海桑田、大陆漂移、板块运动、火山爆发、地震等都是地壳运动

的表现形式。洋底是地壳最薄的部位,且有硅铝缺失现象,没有花岗岩那样坚硬的岩层。因此,洋底地壳是人类将认识的触角伸向地幔的最佳通道,“大洋钻探”是研究地球系统演化的最佳途径。

为了得到整个洋壳 6 000 m 的剖面结构,从而获取地壳、地幔之间物质交换的第一手资料,美国自然科学基金会从 1966 年开始筹备“深海钻探”计划,即“大洋钻探”的前身。1968 年 8 月,“格罗玛·挑战者”号深海钻探船,第一次驶进墨西哥湾,开始了长达 15 年的深海钻探,该船所收集的达百万卷的资料已成为地球科学的宝库,其研究成果证实了海底扩张,建立了“板块学说”,为地球科学带来了一场革命。

1985 年 1 月,美、英、法、德等国拉开了“大洋钻探”的序幕。“大洋钻探”计划主要从两方面展开研究:一是研究地壳与地幔的成分、结构和动态;二是研究地球环境,即水圈、冰圈、气圈和生物圈的演化。

(4) 海洋遥感技术

海洋遥感技术,主要包括以光、电等信息载体和以声波为信息载体的两大遥感技术。

海洋声学遥感技术是探测海洋的一种十分有效的手段。利用声学遥感技术,可以探测海底地形、进行海洋动力现象的观测、进行海底地层剖面探测,以及为潜水器提供导航、避碰、海底轮廓跟踪的信息。

海洋遥感技术是海洋环境监测的重要手段。卫星遥感技术的突飞猛进,为人类提供了从空间观测大范围海洋现象的可能性。目前,美国、日本、俄罗斯等国已发射了 10 多颗专用海洋卫星,为海洋遥感技术提供了坚实的支撑平台。

中国的海洋遥感技术始于 20 世纪 70 年代,开始是借助国外气象卫星和陆地卫星的资料,开展空间海洋的应用研究,解决中国海洋开发、科学研究等实际问题。同时,中国积极研究发展本国的卫星遥感技术。1990 年 9 月,中国发射“风云-1 号”卫星,该卫星上有两个波段为专用的海洋窗口,用于海洋遥感探测。

(5) 海洋导航技术

海洋导航技术,主要包括无线电导航定位、惯性导航、卫星导航、水声定位和综合导航等。

无线电导航定位系统,包括近程高精度定位系统和远程导航定位系统。最早的无线电导航定位系统是 20 世纪初发明的无线电测向系统。20 世纪 40 年代起,人们研制了一系列双曲线无线电导航系统,如美国的“罗兰”和“欧米加”,英国的“台卡”等。

卫星导航系统是发展潜力最大的导航系统。1964 年,美国推出了世界上第一个卫星导航系统——海军卫星导航系统,又称子午仪卫星导航系统。目前,该系统已成为使用最为广泛的船舶导航系统。

中国的海洋导航定位技术起步较晚。1984 年,中国从美国引进一套标准“罗兰-C”台链,在南海建设了一套远程无线电导航系统,即“长河二号”台链,填补了中国中远程无线电导航领域的空白。在卫星导航方面,中国注重发展陆地、海洋卫星导航定位,已成为世界上卫星定位点最多的国家之一。

(6) 海洋采矿技术

不同的海洋矿产资源种类,其开发利用技术各不相同。目前,各类海洋采矿方法正方兴未艾地进行着试采、完善和应用等方面的工作。

5.1.4.2 海洋勘探与开采

海洋矿产资源勘探开发技术，特别是深海矿产资源勘探开发技术，是一项高技术密集型产业，涉及到地质、海洋、气象、机械、电子、航海、采矿、运输、冶金、化工、海洋工程等诸多学科和工业部门。

众所周知，随着世界工业和经济的高速发展，矿产资源消耗量急剧增加，陆地矿产资源在全球范围内日趋短缺、枯竭。为了解决陆上矿产资源的危机，人类唯有把占地球表面积 3/4 的海洋，作为未来的矿产来源。海洋矿产资源勘探开发技术的发展，能帮助使这种可能变为现实。目前，在海洋矿产资源开发中，最有经济意义、最具发展前景和高技术含量最多的，是海洋油气资源与大洋锰结核矿物资源的开发。

(1) 海洋石油天然气的勘探与开采

海洋石油、天然气，是指蕴藏在海底地层中的石油与天然气。海底油气的勘探阶段，要经过地质调查、地球物理勘探、钻探三个步骤。地质调查是指在沿岸地质构造调查分析的基础上，用回声测深仪或航空拍照的资料来研究海底地质、地形的特点。完成地质调查后，就要对可能形成储油构造的海区进行地球物理勘探。这是寻找海底石油最基本的方法，主要包括重力、磁力、人工地震等勘探方式。地球物理勘探的结果只能是理论上说明海底储油构造的存在与否，至于海底是否有石油，还要取决于最后一步——钻探。分析钻探取得的岩芯，就可以得出油层的变化规律、性质以及分布情况，从而完成勘探阶段的使命而进入开采阶段。

开采阶段又分钻井和采油两道工序。在钻井工序中，最早进行海上钻探所使用的钻井都设在岸上，倾斜着向海底钻探。但这种方法只适合浅近海区。后来，人们又建造出类似码头样的钻井平台(图 5-4)，从而使得作业范围扩大到几十米甚至几百米的深海领域。钻井平台又分为固定式与活动式两种，适应不同需要。采油是海底油气开采的最后一道工序，也是最终目的。为实现该目的，世界各国主要使用的采油装置有四种：固定式生产平台、浮式生产系统、人工岛屿和海底采油装置。其中，以固定式生产平台使用最广。

供海上钻生产井和开采油气的工程措施主要有：



图 5-4 海上石油钻井平台

①人工岛，多用于近岸浅水中，较经济。

②固定式采油气平台，形式有桩式平台(台导管架平台)、拉索塔平台、策略式平台(钢盘混凝土重力式平台)。

③浮式采油气平台：a. 可迁移的浮式平台(又称活动式平台)，如座式平台(也称沉浮式平台)、自升式平台、半潜式平台和船式平台(即钻井船)；b. 不可迁移的浮式平台，如张力式平台、铰接式平台。

④海底采油装置：采用钻水下井口的办法，将井口安装在海底，开采出的油气用管线直

接送往陆上或输入海底集油气设施。

供开采生产的油气集中、处理、转输、贮存和外运的工程设施:

- ①装有油气集中、处理、计量以及动力和压缩设备的平台。
- ②贮油设施,包括海上储油池、储油罐和储油船。
- ③海底输油气管线。
- ④油气转运码头,包括单点系泊装置和常规的海上码头(有固定式和浮式两种)。

(2) 大洋锰结核的调查与开采

大洋锰结核又称大洋多金属结核,呈结核状(图5-5),成分以锰为主,且富含多种其他有色金属,如镍、铜、钴等,总组成元素多达近80种,预计21世纪,大洋锰结核将成为世界重要的有色金属来源。



图5-5 海底锰结核

为了能够找到锰结核比较富集、金属品位比较高且便于开采的海区,首先,要有性能优良的远洋调查船。调查船吨位一般在1000 t以上,配有先进的卫星导航定位系统、深海用绞车、起吊设备以及海底地形、深度的测量仪器等。其次,要采用现代化的调查技术。根据调查方式的不同,调查技术可分为直接调查技术与间接调查技术。直接调查技术包括利用各种取样工具、海底电视、遥感水下摄影等采集或观测海底沉积物;间接调查技术包括将水声、浅地层地震技术、旁侧声呐技术等用于海洋锰结核的调查。

大洋锰结核的开采技术,目前比较成熟、可行的有水力提升式采矿技术与空气提升式采矿技术两种。水力提升式采矿技术是通过由采矿管、浮筒、高压水泵和集矿装置四部分组成的系统(图5-6)。这种技术在20世纪80年代中期就已达到日产500 t的采矿能力。空气提升式采矿技术与水力提升式采矿技术大体相同,区别仅在于船上装有大功率高压气泵代替水泵。这种技术的优势是能在水深超过5000 m的海区作业,目前已具有日采300 t锰结核的采矿能力。

值得重视的是,自从20世纪70年代试验结核开采成功以来,锰结核开采规模日益扩大,已由过去各国单独开采,发展到现在多国联合大规模合作开采。特别是随着在《联合国海洋公约》上签字和批准公约的国家越来越多,锰结核开发管理体系已日趋完善。到本世纪末,世界大洋锰结核可进入商品化生产阶段。

其他海洋采矿技术,在本章后面其他小节中还将进行专门介绍。

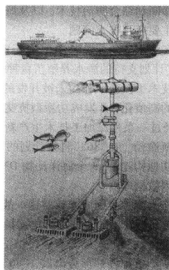


图5-6 锰结核采矿系统示意图

5.1.5 我国海洋开发现状

我国海域辽阔,是发展中的海洋大国。我国海域面积约 300 万 km^2 ,有着丰富的海洋资源,为实现从海洋大国跨入海洋强国的目标,“863”计划在海洋技术领域分别设置了海洋监测技术、海洋生物技术和海洋探查与资源开发技术 3 个主题,以期我国的海洋开发、海洋利用和海洋保护提供先进的技术和手段。以具有 20 世纪 90 年代海洋勘测国际先进水平的“海底地形地貌与地质构造探测系统”的开发和研制为代表的多项先进的海洋勘查与资源开发技术,为我国海洋资源的开发、利用、保护,维护海洋权益,捍卫国家主权提供了高精度的科学依据。

在“863”计划的推动下,我国在合成孔径成像声呐、高精度 CTD 剖面仪和定标检测设备的研制及定标检测设备的研制和近海环境自动监测技术方面等重大技术上取得突破性进展,并已进入世界先进水平行列。通过建立海洋环境立体监测系统技术及示范系统,促进了上海等城市区域性社会经济的发展,并为建立我国整个管辖海域的海洋环境立体监测和信息服务系统奠定了坚实的技术基础。在仅仅 4 年多的时间里,我国沿海周边地区已经在全球海洋观测系统框架下,初步建立起了从航天、航空、海监船体监测体系,从整体上提高了我国海洋环境观测监测和预测预报能力。国家“863”计划及时增加并大力发展海洋领域的高技术,为我国走可持续发展道路起到了积极的示范作用。

“863”计划在海洋生物技术研究上,以促进海水养殖业持续发展和高技术产业化,促进海洋生物高值化产品的新兴产业的发展为目标。在海洋生物基因工程上突破了定点整合转基因鱼、转基因虾等关键技术,推动了我国海洋分子生物学研究进程;在细胞工程技术上突破了多倍体育种育苗、性别控制等关键技术,为我国海水养殖高技术化奠定了坚实基础;在生化工程技术上突破了快速、高通量药物筛选等关键技术,推动了我国海洋生物天然活性物质与药物、海洋生物高值化制品及其相关产业的发展。我国科学家通过努力还突破了海洋生物病害诊断和综合防治技术,以及海水养殖工程优化技术,从而解决了限制我国海水养殖业发展的主要瓶颈技术问题。

在海水养殖业、海洋生物新资源的开发利用及海洋生物高技术的前沿探索方面,由“863”计划支持的海水养殖育苗育种等技术极大地促进了我国蓝色海水农业的可持续发展;通过高技术手段获取和尚未被开发的潜在药物、食品和工农业用品资源,推动了我国海洋生物资源的高值化;开发成功新型抗艾滋病海洋药物和抗肿瘤新药;以优质甲壳质、壳聚糖为原料,经过一系列深加工技术生产新型生态农药“农乐一号”,开辟海洋生物技术真正为农业服务的新途径。在“863”科技计划的支持下,我国在特有海洋生物资源功能基因组研究方面已经成功地构建了 13 个海洋动物 DNA 表达文库,通过大规模测序,建立起了我国的海洋生物基因数据库。

作为维护我国海洋权益这一战略目标而设立的“海底地形地貌与地质构造探测技术”专题,研究开发出的多波束全覆盖精密测深技术,投入使用海底全覆盖探测系统,为我国专属经济区和大陆架勘测专项提供了高新技术支撑,为海底区划界提供了重要的科学依据。从海洋矿产资源勘探形势出发,“863”计划重点支持开发了海上油气资源快速探查与综合评价技术的研究,并在应用中获得一批有价值的油气异常显示,在海上探明天然气储量 5 000 亿 m^3 ,形成年产天然气 80 亿 ~ 100 亿 m^3 的生产能力。沉积物捕获器等 10 余种自主研制的一

批海底探查新装备,从整体上提高了我国海洋地质调查技术能力。

“863”计划海上大气田探测技术和海洋边际油气资源开发技术取得了重要成果,海上中深层高分辨率地震勘探技术跻身世界前列;海上多波地震勘探设备,打破了国际技术垄断;解决了高温超压钻井世界性难题的关键技术。成功开发并投入应用的大位移井技术减少海上钻井平台的建造数量和工程费用投资,在提高经济效益的同时,使得用常规方法开发没有经济效益的边际油田得以有效开发。实践表明,利用这些技术与成果,揭示深部油藏基底,发现天然气水合物赋存证据,获得海洋地质和石油地质科学上的新认识、新发现,“863”计划正在使中国真正走上海洋强国之路。

5.2 海洋矿产资源的开发利用

海洋矿产资源按其上覆海水的深度可分为两类:浅海矿产资源和深海矿产资源。

5.2.1 浅海矿产资源

通常把海水深度不超过 200 m 的称之为浅海,也叫大陆架。浅海总面积约为 2 800 万 km^2 ,占海洋面积的 7.6%。浅海蕴藏的资源十分丰富,主要有:

①石油和天然气。海底石油储藏量约 1 350 亿 t,天然气约 140 万亿 m^3 ,约占世界油气总量的 45%。目前,海上油气开采量约占全球油气开采量的 30%。海洋石油和天然气的勘探开发,发展速度很快。海洋石油的产量,1950 年仅 0.3 亿 t,占世界石油总产量的 5.5%;1960 年为 1 亿 t,占世界石油总产量的 9.2%;1995 年为 9.65 亿 t,占世界石油总产量的 30.1%。海洋天然气的发展速度虽不如石油,但其产量也从 1980 年的 2 903 亿 m^3 增加到 1995 年的 4 421 亿 m^3 。浅海面积的 37% 即 1 000 万 km^2 可能蕴藏有石油,其石油储量估计在 1 000 亿 t 以上,为整个陆地石油储量的 1/3 以上。

②煤和金属矿藏。这些矿藏多为陆地矿床向海底延深的部分,因其处于海水之下,给开采带来极大难度。

③海底砂矿床。海底砂矿床主要是由于河水运搬陆地的有用物质在流入大海之后因流速下降沉积而成,其有用矿物质有金刚石、锡石、锆石、砂金、铁矿砂、砂砾、重晶石、金红石、海绿石、独居石、银、铂、石榴石等,世界 90% 的锆石和 90% 的金红石就产自海滨砂矿。此外,海洋生物的遗骸形成石灰质矿如贝壳沉积层以及海洋中自生自长的磷结核等,海滨中的砂砾也是建筑材料的主要来源。

5.2.2 深海矿产资源

①海底软泥层。深海底上沉积有平均厚度为 600 m 的软泥层。软泥层因地域不同而含有不同的组分,有硅质、钙质、铝质、多金属等软泥层。如红海海底的多金属软泥层,含 30% 左右的铁、1%~7% 的铜、锌及其他金属,硅质、钙质、铝质软泥虽然含金属成分不多,但因其成分的特殊性,可用于陶瓷工业和化工生产的催化剂、吸收剂等,也可以作深海药物原料或作为开采锰结核的附产物加以利用。

②锰结核(多金属结核)。锰结核又称锰矿球、锰团块,是一种以锰为主的多金属结核。广泛分布和赋存于水深 4 000~6 000 m 的深海底软泥层之上的一种土豆状、呈棕褐色的团块

矿石。其直径大多为1~25 cm,平均直径为5 cm,表面不规则,金属含量为:锰25%、镍1.5%、铜1.2%、钴0.2%。重量可达几十kg以上,它们像卵石一样散布于深海的洋底,自英国HMS挑战号在1872年~1876年远洋考察中发现锰结核至今已有120多年的历史。据美国加利福尼亚大学Mero教授估计,大洋底覆盖的锰结核储量约为(2~3)万亿t,仅太平洋就有1.7万亿t之多。据锰结核勘查,位于太平洋夏威夷与墨西哥之间的CC区是锰结核的富集区。CC区平均水深4 000~6 000 m,面积约500万km²,结核丰度5~25 kg/m²(个别高达35 kg/m²),结核储量约300亿t,金属品位锰30%、铁10%、镍1.5%、铜1.2%、钴0.2%。可见,大洋深处蕴藏着丰富的矿产资源。

据推算,海洋中全部锰团块含有的各种金属,其储量远远超过陆地上的储量。更重要的是,锰团块是一种再生沉积矿物,它的储量还在不断增加,仅太平洋每年便可增长1 000万t。尽管全世纪各大洋都分布有锰团块,但以赤道北面东太平洋海底的锰团块分布面积最广,富集度最高,而且金属品位也比较高。其中,从墨西哥西南到夏威夷南部的一条长达4 600 km,宽900 km的海域里,海底表层密密麻麻布满了锰团块,平均密度为每平方米10 kg以上,镍、铜、钴的总品位超过3%,可谓遍地都是宝。这一带海域地形比较平坦,海况条件也比较好,有利于开采作业,是目前各国进行科学研究和开采试验的主要场所。联合国分配给我国开采的海域也位于这一地区。

③深海钴壳矿床。钴壳矿床是在水深800~2 400 m深的海底山脉的斜坡面或顶部基岩上呈层状产出的坚硬矿床。钴壳厚只有数毫米或数厘米,组成成分与锰结核基本相似,但其钴的品位较高,高达1.0%,为锰团块中的几倍。其铂的含量也较高,品位为0.3~0.6 g/t。据调查,仅在夏威夷各岛的经济水域内,其蕴藏量便达1 000万t。钴壳中除含有钴外,还含有约0.5%的镍、0.06%的铜、24.7%的锰,另外还含有大量的铁,其经济价值约为锰团块的3倍多。钴壳矿床埋藏较浅,因此更加容易开采。

④海底热液矿床。海底热液矿床通常赋存于水深2 000~3 000 m的海底,含有丰富的Cu、Pb、Zn、Ag、Au等多种金属。由于它是火山性的金属硫化物,故又被称为“重金属泥”。它的形成是由于海水通过海底地壳裂缝渗透到地层深处形成高温热水,把岩浆中的盐类和金属溶解,变成含矿溶液,然后受到地层深处高温高压作用喷到海底,使得深海处泥土含有丰富的多种金属。通常,深海处温度较低,而这些地方由于岩浆的高温,使温度可达摄氏50多度。

人们最早是在1973年于墨西哥海面 and 加拉帕戈斯海岭(位于南美大陆西边)发现巨大的热水矿床堆积物。加拉帕戈斯矿床宽300 m、长1 000 m、厚40 m,蕴藏量约1 200万t。1981年在美国俄勒冈州附近海面也发现了这样的热水矿床。另外硫球海沟、伊豆、小笠原群岛等日属经济水域也发现有热液活动,有望发现新的海底热液矿床。

热水矿床的价值很高。以加拉帕戈斯矿床为例,金的品位是陆地金矿的40倍左右,此外还含有10%的铁、铜,0.1%的银、镉、钼、铅、钡、锌等。只要含有0.1%的金,2万t矿泥的价值便达3 000万美元,可见,热水矿床和锰团块不一样,一方面含有的贵金属较多、价值很高;另一方面,赋存于中等深度的海底,开采相对比较容易。因此热水型矿床对人们具有更大的吸引力。

5.2.3 海底基岩中的固体矿床

浅海底基岩中的固体矿产资源比其他的海洋矿产资源少很多,目前已发现的浅海底基岩

中的固体矿床主要有硫、铁、煤、石膏等。日本九州附近海底还发现了世界上最大的铁矿之一。亚洲一些国家还发现许多海底锡矿。已发现的海底固体矿产有 20 多种。我国大陆架浅海区广泛分布有铜、煤、硫、磷、石灰石等矿。然而,由于开采难度大,采矿成本高,因此,目前只开采靠近海岸的少数矿产资源。如弗里波特硫磺公司开采了格兰德附近海底中的硫矿; Mexico 湾海底盐丘的开采;波兰 1963 年开始海底钾矿开采;英、日利用竖井开采海底煤矿;加拿大纽芬兰海底铁矿开采等。

世界许多近岸海底已开采煤矿矿藏。如日本、智利、英国、加拿大、土耳其等。日本海底采煤事业发展很快,开采规模最大,海煤产量占世界之首,近年来日本的煤炭总产量达 1800 万 t,其中四个海底煤矿的开采量达 800 万 t 至 900 万 t,约占全国煤炭总产量的 45%~50%。

纽芬兰海底铁矿的总储量估计有几十亿吨,现在正从贝尔岛的入口处,用与陆上地下采矿方法相似的开凿竖井和坑道的方法进行开采。

5.3 海洋开采理论与技术

海底采矿已有一段历史,如英国从 1620 年起就开始了海底采煤,但在 20 世纪 60 年代以前,海底采矿的规模小、范围窄、离岸近。60 年代以后,受到了人们的重视,特别是海底石油和天然气的开发有了较快发展,深海锰结核和热液矿床的开发也有迅速发展的趋势。目前,全世界从海底开采出来的矿物产值以石油和天然气占首位,达总产值的 90% 以上;其次是煤,占 3%~5%,砂砾和重砂矿占 2% 左右。中国目前正在开采的海底矿物有建筑用的砂砾和钛铁矿、锆石、独居石、磷铀矿等重砂矿以及石油和天然气等,也已从太平洋底取得了一定数量的锰结核。本节将论述海洋采矿的特殊性及其基本分类。

5.3.1 海洋采矿的特殊性

21 世纪的海洋科学与开采技术的结合正在逐渐证实“海洋深处有铀、铁、银和金矿,开采相当容易”的观点。今天,在商业和战略双重利益的激励下,一些矿业公司已着手准备从水下逾 1 km 深处的储存在海床上火山区域的丰富矿藏中开采金属矿物,这些火山区被称为大洋脊,一般距离海洋表面 1~2 km,它们蕴藏着丰富的铀、铁、银、金、铜和铅。

总部设在温哥华的 Nautilus Minerals 公司在多伦多证交所上市,公司名称与尼莫船长的潜艇同名。该公司正将重点放在巴布亚新几内亚附近的马努斯盆地上。而总部设在悉尼、在伦敦上市的 Neptune Minerals,则把精力集中在新西兰北岛海岸附近的一片区域。

海底开采的前景,引发了一些环保人士的“本能”反对,公众会出现一些正当的担忧。但有专家认为“深海采矿将比陆上开采造成的危害小”。理由是海底开采不存在酸矿排放问题,这是因为酸性物质已被碱性海水立即中和。开采作业不会碰及被称为“海底黑烟囱”的活性热液喷口,这些喷口寄生着千奇百怪的海底动植物群落,它们已进化到能在极端条件下繁衍兴旺。而硫化物矿藏直接坐落在海床上。

尽管如此,海洋面积大;海洋水很深;海水有很强的腐蚀性;海洋环境恶劣多变。海洋矿产资源的分布、赋存状态、矿石物理性质等,也与陆地矿产资源有很大的差别。除了少数近海岸海底基岩矿床的开采方法可以借鉴陆地地下开采方法以外,绝大多数海洋矿产资源的

开采,无论在技术和工艺方面,还是在设备和环境保护方面都有其独特的要求。海洋采矿既有陆地采矿不可能有的有利条件,也要面对陆地采矿无需面对的特殊困难。

(1) 有利条件

海洋开采不占用土地。海洋开采是在无边无际的海洋环境下进行,不占用人类宝贵的陆地资源。科学技术的进步,更有可能将海洋采矿中采、选、冶各项工程全部在采矿船上实现,在海上得到的不是矿石,而直接是金属产品,从而避免选、冶工场占用土地。

公海海洋资源人类共享,不受疆域限制,更不受政治经济制度的限制,只要有能力,任何国家都有权利去开采。

大多数海洋矿产资源(海底基岩矿床除外)上面没有较厚的覆盖层,所以不用剥离爆破,即可进行回采。大多数海洋矿产资源属于未固结的松散沉积物,因此,其采矿过程也不用穿孔爆破。

海洋开采的技术起点比较高,可以运用一切可能的高科技、先进机械设备,自动化程度高。

有些海洋资源,如锰结核,其沉积增长的速度大于目前开采消耗的速度。据调查和计算,大多数情况下,海洋中锰、钴、镍堆积的速度比消耗的速度分别快3倍、4倍和4倍。因此,只要在开采这些矿产时,注意生态环境保护,海洋矿产资源就能再生,真正成为取之不尽的海底宝藏。

(2) 不利因素

海洋采矿设备特殊、组成复杂。除了用陆地地下采矿法开采海底基岩矿床时,所用的技术和设备与陆地采矿接近,其他的海洋开采技术和设备则与陆地采矿技术与装备相去甚远。海洋环境以海水为基本组成元素,它的基本特征是水深浪高、具有很强的腐蚀性、高压、缺氧等。在恶劣的海洋环境下,必须借助自动化程度高、可靠性好的、功能强大、耐腐蚀性能力强的综合性新型采矿设备系统来完成海底矿石采集和初选、矿石提升和运输等工作。

海洋采矿受海洋环境和气候的影响大。其中对海洋采矿工作影响最大的是台风和海浪。轻的时候会起采矿船体晃动、降低工作效率,严重时会引起停工停产,甚至损坏设备等。根据天气情况,采取必要的防范措施是必需的。因此,准确的天气预报系统,是确保海洋采矿顺利进行的关键因素之一。

海底采矿监控难度大,对海图精确度要求高。海底采矿是在高温、高压、能见度差、缺氧的环境下进行的。要实现对采矿工作的监控工作,必须采用先进的监控技术,比如侧扫描声呐,定位声呐,电视摄像等手段。同时,必须绘制准确的海图(海底地形及海水深度),因为海图是确保海洋采矿顺利进行的另一个关键因素。

海底开采对海洋环境无疑将带来影响,但如何影响,影响的程度如何,目前存在不同的看法。有一点是肯定的,那就是,海底开采对环境的影响是一个多学科相互作用、涉及面相当广、又比较难解决的复杂问题。

采矿设备定位技术复杂。为了确保采矿作业按设计的路线、顺序等完成对圈定矿体的回采工作,必须有先进的采矿设备的定位系统。目前常用的方法有卫星定位法、海底声应答器声测定位法和GPS定位法。

海洋采矿的给养、后勤服务等保障工作有一定困难。为保证海洋采矿的顺利进行,必须建立一个组织严密、计划周到的后勤保障体系。

5.3.2 海洋采矿方法基本分类

由于海洋矿产资源的性质及所处的环境有较大的一致性,因此,海洋采矿法的种类没有陆地采矿方法那么多变。尽管如此,由于海底矿产资源种类繁多、状态各异、分布广阔、埋深悬殊,开采的方法和使用的装备也不尽相同。

海底采矿技术一般分基岩矿床开采和沉积矿床开采两大类。基岩矿是指存在于海底岩层和基岩中的矿产,如非固态的石油、天然气和固态的硫磺、岩盐、钾盐、煤、铁、铜、镍、锡、重晶石等。沉积矿大都呈散粒状或结核状存在于海底各类松散沉积层中,例如分布在海滨的磁铁矿、钛铁矿、铬铁矿、锡砂、锆石、金红石、独居石、金、铂、金刚石等重砂矿和砂、砾石等;分布在近海底的磷灰石、海绿石、硫酸钡结核、钙质贝壳和砂、砾石等;分布在深海底的锰结核、多金属软泥、钙质软泥、硅质软泥、红黏土等。海底沉积矿开采,由于深海与浅海采矿技术的难度不同,因而又区分为浅海沉积矿开采和深海沉积矿开采两种。

5.4 海洋采矿工艺

海洋采矿方法一般可根据矿产资源的类型进行分类。目前,赋存于海洋中的矿产资源主要有海底中的基岩矿床和海底表层的沉积矿床,因此,海洋采矿方法也基本上被分成海底基岩矿床开采法和海底沉积矿床开采法。各类采矿方法因设备、工艺、水深的不同又有所不同,具体分类情况如图 5-7 所示。

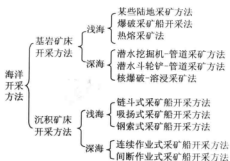


图 5-7 海洋采矿方法基本分类

在开采海底矿产之前,须查明所采矿床的分布范围、面积、埋深、储量、品位以及当地自然条件和海陆运输能力等。在此基础上,根据矿产的形态选择合适的开采方法、装备和设施。

5.4.1 海底基岩矿床开采工艺

海底基岩矿床的开采主要指开采赋存于海洋海底岩层中的固体、液体和气体矿床。海洋固体矿产资源,按赋存条件和开采方式分为浅海海底堆积砂矿、海底岩层中固体矿床、深海海底堆积的锰结核和多金属软泥。目前主要开采前两者,深海采矿还处于研究和试采阶段。而液体和气体矿床主要指海底石油和天然气。

3000 年前希腊人已自岸边矿井开采延伸至海底部分的矿体。20 世纪初开始以工业规模开采滨海砂矿。20 世纪 50 年代起,随着科学技术的进步和陆地高品位易采矿床资源逐渐减少,海底采矿日益引起重视。

海底基岩矿床的开采,原则上可以借鉴与陆地上所用的开采工艺类似的方法。海底基岩矿床开采是在海洋环境下进行的开采,其最大的技术难点是如何防止海水向采矿工程的渗漏和入侵。

(1) 石油和天然气开采

非固态的石油和天然气开采使用的开采工程设施主要为固定式平台,在平台上钻井采集到

油(气)后,通过输运系统送往岸上;水深较浅处也有用填筑人工岛进行钻井采油(气)的(图5-8)。

而在水深较大的海域,多应用浮式平台或海底采油(气)装置(船)进行开采。图5-9给出了除人工岛钻井平台开采法以外的另外三种常见海底石油气开采方法,它们分别是:

- ①水深浅,自升式钻井架开采方式:支撑腿延伸至海底;
- ②水深较深,张力腿钻井架开采方式:整个系统飘浮在海面,但有锚链固定在海底;
- ③水深深,船上钻井法:依靠船本身装置完成定位。



图5-8 日本海上人工岛

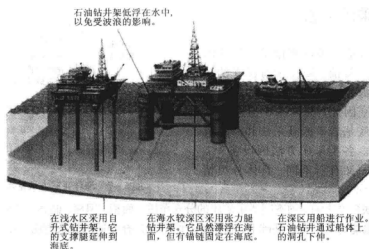


图5-9 海底石油气开采的三种常用方式

(2) 浅海海底基岩中固体矿床的开采

在浅海大陆架基岩中,与陆地一样,也赋存各类固体矿床。目前主要开采岸边矿床延伸至海底的部分。常用的开采方法是自陆地开掘井巷通至海底。海水不深时可堆造人工岛构筑立井。中国和英、日、加、美、智利等很多国家都在开采海岸附近的海底矿床。所用采矿方法应保证顶底板岩层不产生通至海底的裂隙,以防止海水涌入。此外,还须加强顶底板监测和水质化验工作,以便及时采取安全措施。而美国在墨西哥湾成功地在平台上开采海底的自然硫矿。

固态的煤、铁、锡等基岩矿开采一般从岸上打竖井,通过海底巷道开采,或利用天然岛屿和人工岛凿井开采,也有利用海底预制隧道——封闭井筒方式开采的(图5-10)。

海底基岩矿床开采中的关键是必须使作业巷道与海水隔绝,其他方面与开采陆地同类矿藏的方法基本相似,所用机械设备也基本相同。另外,海底铜、坑采掘多采用非爆破掘进法,

因此影响采矿速度。但自20世纪70年代后,非爆破掘进速度已提高到每小时4.6 m,这些采矿业有可能向远离海岸的海区发展。

海底硫磺矿开采 通常采用井下加热熔融提取法,先把加热到350°F的海水用泵从边导管注入硫磺矿层,使融化的硫磺液从内套管上升至一定高度,然后用空气提升法采收。

海底钾盐矿和岩盐矿开采 由于钾盐和岩盐也是可溶性矿物,也可用溶解采矿法。其技术原理与开采硫磺矿相同,但一般都采取竖井开采。海底重晶石矿正在开采的美国阿拉斯加卡斯尔海滨离海岸1.6 km,矿脉在海底表土下15.2 m。由于覆盖层较薄,所以采取了水下裸露开采法,进行水下爆破,然后用采矿船采集炸碎的岩石。

如前所述,开采海底矿床时,涌水一般要比陆地采矿的大得多,因此,必须采取相应的措施来防止过大的涌水,避免水害。

① 开采前查清采区内的地质构造(断层等其他含水通道结构)及水文地质情况。

② 采空区宜及时充填,防止岩层移动。所用充填料最好为石英砂之类的刚性材料,以尽量降低顶板可能的下沉量。

③ 禁止使用易导致岩层破坏、损伤的大爆破作业方式。

④ 矿柱布置要规则,确保顶板完整。

⑤ 保留足够厚度的不透水保护岩层,如遇裂缝时,应采取有效措施将其封闭。

⑥ 加强地压管理和岩移监控,研究制定各种地压控制和预防岩移的措施。

⑦ 配备足够数量的排水设备,并在巷道内设置防水墙、防水门等设施,做到防水害于未然。

其他基岩矿床开采方法还有潜水单斗挖掘机——管道提升开采法、潜水斗轮铲——管道提升开采法及核爆破——化学采矿法。前两种方法将在5.6节中进行介绍,下面简单介绍核爆破——化学采矿法。

对埋藏在海底深处的大型金属矿,条件允许(有合适的溶剂剂、矿床能渗透、集液没有困难等)时可用核爆破——化学采矿法进行开采。

对核爆破的要求是:既能破碎矿体,其围岩又不遭受破坏,维持不透水性,保持溶液不流失。

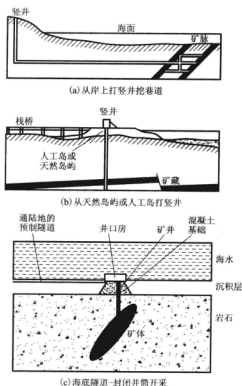


图5-10 三种海底基岩矿床开采方法示意图

核弹在矿体中爆炸威力巨大, 450 g 铀完全裂变产生的能量相当于 9 000 t TNT; 450 g 钚完全反应产生的能量相当于 26 000 t TNT。爆破中心能产生数百万度高温和高能量的冲击波。热能将爆炸点附近的矿体气化, 形成充满高热气体的空腔, 其扩展时, 使矿体产生裂隙、腔顶塌落, 类似在矿房内崩落矿石; 充满破碎矿石的矿洞很像水冶工厂中的溶浸大罐。然后通过钻孔将双套管的采矿装置通向已破碎矿体的底部。溶浸液经中心管与套管之间的空隙输送给已破碎的矿体并完成化学浸出反应。浸出富液汇集到集液坑, 经中心管抽送至岸(或岛屿)上的工厂或停泊在开采船附近的船上进行金属提取加工(图 5-11)。

核爆破成本低, 产生的放射性物质 90% 以上被熔融的矿石吸收, 并沉入矿洞底部。核爆破后, 有 70% 的矿石块度在 30 mm 以下, 基本满足溶浸法要求。

该方法特别适合海底埋藏深, 品位较低而厚大的矿体开采。但该方法在技术层面来讲已没有问题, 但在实际工程中的推广应用仍有许多问题需要解决。

5.4.2 浅海沉积矿床开采工艺

海滩、近海底矿的开采, 露出水面的海滨砂矿, 通常采用露天开采方法。陆地上使用的挖掘机械, 如拉杆电铲、钢索电铲、推土机等都可用于海滨砂矿的开采作业。水面以下砂矿床的开采, 目前作业水深大多在 30 ~ 40 m 范围内, 使用的采矿工具有 4 种: 链斗式采矿船、吸扬式采矿船、抓斗式采矿船和空气提升式采矿船(图 5-12)。

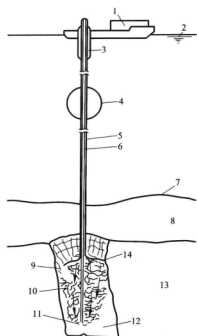


图 5-11 核爆破——化学采矿法

1—操作船；2—海面；3—稳浮筒；4—主浮筒；5—套管；6—中心管；7—洋底；8—现代海洋沉积物；9—核爆炸破碎带；10—流动溶剂；11—集液坑；12—矿体；13—硬岩；14—溶液扩散区

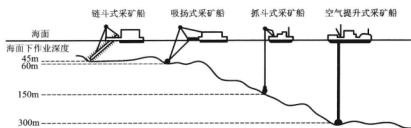


图 5-12 开采近海底沉积矿的 4 种采矿船示意图

前 3 种的构造和工作原理与挖泥船类似。空气提升式采矿装置由气管、气泵和吸砂管等

部分组成, 气管与吸砂管的中部或下端相连通, 作业时将吸砂管下端靠近砂矿床, 启动气泵, 压缩空气使吸砂管内产生向上流动的掺气水柱, 从而带进砂矿固体颗粒, 连续压气就可达到采矿的目的。这种装置的缺点是作业水深增加时, 压缩空气的成本费呈指数倍增长。

此外, 20 世纪 70 年代以来还发展了一种海底爬行式采掘机, 可以载人潜到海底作业, 所需空气和动力由海面船只供应。如意大利制造的 C-23 型潜水挖砂机的作业水深达 70 m, 能在海底挖掘宽 5 m、深 2.5 m 的沟, 每小时前进 140 m, 挖砂 230 m³。

5.4.3 深海沉积矿床开采工艺

20 世纪 60 年代, 一些工业发达国家开始调查深海海底矿产资源, 并研究开采技术。已知的深海海底矿产资源主要是锰结核, 有些海域发现含金、银、铜、铅、锌等的多金属软泥。近年已建立起八个跨国财团, 约有一百多家公司在从事勘探与试采工作。中国近几年展开深海调查研究工作, 多次在太平洋采集到锰结核。

深海矿开采方面, 目前最有开采前景的是深海底表层矿(沉积矿), 如深海锰结核和多金属软泥。

锰结核是含有锰、铁、铜、镍、钴和其他 20 多种稀有元素的球形结核, 广泛分布在世界各大洋 2 000~6 000 m 深的洋底表层。太平洋中部的结核品位最高(表 5-4), 储量最大。有些海域的锰结核中镍、钴、铜的品位高于陆地开采的矿床。已发现世界各大洋底锰结核的总储量约 3 万亿 t, 仅太平洋就有 17 000 亿 t 左右, 它的储量在不断增长, 在太平洋底, 每年约可增长一千万吨左右。

表 5-4 锰结核主要组成成分

元 素	品位波动范围 /%	平均品位/%		
		太平洋	大西洋	印度洋
Mn	7.9~50.1	24.2	16.3	15.4
Fe	2.4~26.6	14.0	17.5	14.5
Co	0.01~2.3	0.35	0.31	0.25
Ni	0.16~2.0	0.99	0.42	0.45
Cu	0.03~1.6	0.53	0.20	0.15
Pb	0.02~0.36	0.09	0.10	0.07

深海锰结核已被公认为是一种具有商业开采价值的矿产资源, 近 20 年来主要在研制低成本、高效率的采矿装置。由于锰结核松散地分布于深海大洋底表层, 关键问题是需要找到一种合适的垂直提升装置。目前公认最有希望的有 3 种: 链斗式采矿装置、水泵式采矿装置和气压式采矿装置。

链斗式采矿装置是在高强度的聚丙二醇酯绳上每隔 25~50 m 安装一个采矿庖斗, 开采时船首的牵引机带动绳索, 使庖斗不断在海底拖过, 挖取锰结核并提升到船上。1970 年 8 月日本已在太平洋水深 4 000 m 处成功地进行了试验。

气压式采矿装置,是将集矿头置于洋底,开动船上的高压气泵,高压空气沿输气管道向下,从输矿管的深、中、浅三个部分注入,在输矿管中产生高速上升的固、液、气三相混合流,将经过筛选系统选择过的结核提升至采矿船内,提升效率为30%~35%。

水泵式采矿装置,是将高效的离心泵放在输送管道中间的浮筒内,浮筒内充以高压空气,支撑离心泵和管道浮在水中。由于高效离心泵的作用而产生高速上升的水流,使锰结核和水一起沿管道提升至采矿船内。

20世纪70年代末在连续索斗采矿船上,由带有很多拖斗的无极绳连续转动,将锰结核自海底捞出(图5-13)。采矿船横向慢速移动,能使若干拖斗同时一定宽度上连续作业。20世纪70年代曾用压气升液采矿船试采深5000m洋底的锰结核。压气在不大于1000m深处进入吸砂管。也曾用水力采矿船在1800m洋底进行了试采。深海采矿船都配有水深控制、海底摄影和电视等设备和勘测仪器。目前都未投入工业生产。

1963年英国“发现者”号调查船在红海发现多金属软泥,70年代末在东太平洋发现含铜、锌、银等元素的多金属硫化物,都未进行工业开采。1965年,美国海洋调查船“在西洋双生子”

Ⅱ号在红海作业。他们发现在3个2000m的深渊里水温高达56℃,简直像是温泉。他们分析化验那里的海底泥土,结果竟令他们兴奋不已。原来在这些海底泥土中有大量的黄金!黄金的品位比陆地上的金矿高40倍,仅一个小小的“阿特兰蒂斯”深渊里,就有黄金45t。正当人们把目光投向红海时,1978年,太平洋加利福尼亚湾附近的墨西哥海面又传来了海底冒烟的消息。经调查,海上的“烟”原来是海底裂缝中喷出来的金属硫化物在海洋里漂浮,看上去就好像是“烟”一样了。从海底喷泉出来的这些烟堆积在海底,就形成了金属硫化矿物,里面含有大量的有用金属。其中不仅有诱人的黄金,还有银、铅、铜、铁、锌,等等。

这些金属是从哪里来的呢?科学家各有各的说法,一种是蒸发说,一种是溶盐说,还有一种是火山说。各有各的道理。总之,多金属软泥是从热卤水中沉淀出来的,所以叫它海底热液矿。

多金属软泥也是一种具有开采价值的深海底矿产资源。联邦德国已研制成功一种开采红海多金属软泥的装备,即在采矿船下拖曳一根2000m长的钢管柱,柱的末端有一个抽吸装置。装置内的电控摆筛能搅动像牙膏状的软泥,通过真空抽吸装置、吸矿管,把含有海水的金属软泥吸到采矿船上来,然后经过处理并除去水分,最后即可获得含有32%Zn、5%Cu和0.074%Ag的浓缩金属混合物。当然,这种开采方法,还处于尝试阶段。我们可以预计在不久的将来,海洋上会掀起一个热液矿的开采热。这项举措一旦成功,那么,人类需要的黄金、白银以及其他的一些有用的金属的海底开采量就会成倍地增加。

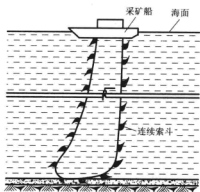


图5-13 连续索斗采矿船采取锰结核示意图

5.5 海洋船开采系统的基本构成

海洋船开采系统作为深海采矿的基本技术,由以下4个子系统组成:

(1) 集矿子系统

集矿子系统由自行式集矿机和水力集矿头组成,还包括结核破碎机、初选设备和各种测控传感器,用以采集海底结核。

(2) 扬矿子系统

扬矿子系统是深海采矿工程中的提升运输通道。由长达4~5 km的扬矿硬管、中间舱、长300~500 m的扬矿软管和水力提升泵组成。扬矿硬管的上端与船相连接,在水下400 m和800 m处设二级水力提升泵;扬矿硬管的下端与中间舱连接。中间舱中设均匀给料机和结核贮存舱。中间舱和集矿机通过扬矿软管连接。

(3) 测控子系统

海洋采矿系统是一个高科技、自动化程度高的机械系统。测控子系统则是整个海洋采矿的电脑化指挥中心,是协调和控制各种作业的枢纽。比如,控制采矿作业和结核输送,监测管内的流量、压力和其他各种传感器信号的变化并做出相应的调整。

(4) 水面支持船子系统

水面支持船系统是采矿作业的工作平台。包括整个水下系统的布放、回收和悬挂,还包括管线和水下系统的贮存。

深海作业时,自行式集矿机在海底来回行走,进行结核采集,水面船按照预定的采集路线作极低速的移动,为了克服风、浪、流等外力和采矿系统水下拖曳阻力、船舶必须提供足够的反向推力。先进的导航和动力定位系统是确保这些工作有条不紊、准确无误的基本前提。

水下作业系统重量可达数百上千吨,其布放和回收都不是一件简单的事情,必须要有经过特殊设计的吊放装置。采矿水下作业系统在工作时悬挂在船上,为了减少船舶运动对水下作业系统的影响,需要考虑各种运动补偿装置。

动力定位系统和采矿作业系统均需要大量用电,总功率可能以兆瓦计,因此,应采用高压供电系统。

5.6 几种常见的海洋船开采方法及基本构成

常见的海洋船开采方法,根据集矿设备和方式以及矿石提升运输设备和方式的不同,可以大致被分成以下9种:

- ①潜水单斗挖掘机——管道提升开采法;
- ②潜水斗轮铲——管道提升开采法;
- ③链斗式采矿船开采法;
- ④吸扬式采矿船开采;
- ⑤气升式采矿船开采;
- ⑥钢索式采矿船开采;
- ⑦拖斗采矿船开采;

- ⑧连续绳斗采矿船开采；
- ⑨流体提升式采矿船开采。

(1)潜水单斗挖掘机——管道提升开采法

如图 5-14 所示,该法采用类似陆地露天开采的矿石采掘工艺(海底穿孔爆破)采掘矿石,然后用水利提升采矿船开采法的管道提升法,将已破碎的矿石运到洋面采矿船上。

潜水单斗挖掘机——管道提升开采系统包括以下一些主要设备:

- ①钻孔船及潜水穿孔机;
- ②潜水单斗挖掘机;
- ③破碎机及贮存仓;
- ④提升装置及管道系统;
- ⑤采矿船、自动监控及操作装置;
- ⑥运输船等。

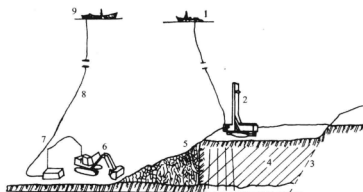


图 5-14 潜水单斗挖掘机——管道提升开采法

1—钻孔爆破供应船;2—潜水穿孔机;3—断层;4—矿体;5—爆堆;
6—潜水单斗挖掘机;7—破碎机及贮存仓;8—提升管道;9—采矿船

潜水单斗挖掘机——管道提升开采法基本工艺流程如图 5-15。

钻孔爆破: 钻孔船将潜水钻机运至指定海域,在船上通过声相装置、自动控制系统等手段遥控潜水钻机完成钻孔,并遥控自动装药设备完成装药,然后遥控起爆。

采装矿石(集矿): 遥控潜水挖掘机挖掘已破碎的矿石,并转入海底破碎机。

破碎矿石: 海底破碎机将矿石破碎成符合管道提升要求的矿石块度。

提升矿石: 利用管道提升装置进行矿石提升。

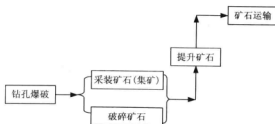


图 5-15 潜水单斗挖掘机——管道提升开采法基本工艺流程

矿石运输：用运输船将矿石运至指定地点。

(2) 潜水斗轮铲——管道提升开采法

潜水斗轮铲——管道提

升开采法如图 5-16 所示，基本构成如下：

①潜水斗轮铲（斗轮挖掘机）和穿孔车；

②中继车；

③提升装置及管道系统；

④采矿船、自动监控及操作装置；

⑤运输船等。

潜水斗轮铲——管道提升开采法的工艺流程与潜水单斗挖掘机——管道提升开采法类似。穿孔车以中继车为中心，在适当的范围内移动并对矿体进行穿孔爆破。

破碎的矿石由斗轮铲装采并送入提升系统，后由提升泵经挠性软管和提升管道提运到采矿船，再由运输船运往指定地点。

(3) 链斗式采矿船开采法

如图 5-17 所示，链斗式采矿船开采法主要由平底船、挖掘装置、洗选装置、动力设备、供水排水设备、尾矿及砾石排弃装置以及上部结构物所组成。

采矿船的所有设备都装在平底船上，因此，必须有足够的刚度、强度和稳定性，且尺寸合理、移行方便。

挖掘装置由斗链、斗架、上下滚筒及托辊等组成。斗链是由若干个挖斗彼此间用斗销轴连接而成的无极链。挖斗的大小直接影响采矿船的效率和生产能力，挖斗容积应根据采矿船年生产能力及挖掘速度综合确定。基本计算式如下：

$$Q_h = \frac{60nqK_z}{K_e}$$

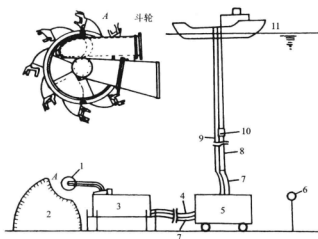


图 5-16 潜水斗轮铲——管道提升开采法

1—斗轮铲；2—矿体；3—穿孔车；4—电缆；5—中继车；6—海底定位装置；7—挠性管道；8—提升管道；9—电信号电缆；10—提升泵；11—采矿船

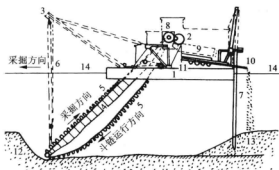


图 5-17 链斗式采矿船开采法

1—平底船；2—主驱动；3—前桅；4—斗架；5—斗链；6—拉绳；7—桩柱；8—受矿漏斗；9—圆筒筛；10—尾矿排出槽；11—选矿装置；12—矿砂层；13—尾矿堆；14—海面

式中: Q_h ——采矿船的小时生产能力, m^3/h ;

n ——斗链速度, 斗/min;

q ——挖斗容积, m^3 ;

K_x ——挖斗内的平均满斗系数;

K_e ——矿砂的平均松散系数。

斗架长度不宜过长或过短, 应根据水深、开采矿层厚度及斗架倾角等予以确定。基本计算式如下:

$$L = \frac{H + H_g + M - r}{\sin \alpha}$$

式中: L ——斗架长度, m;

H_g ——平底船的干舷高度, m;

M ——斗架上支点中心到甲板的垂直距离, m;

r ——下滚筒中心到斗唇的距离, m;

α ——斗架倾角, 最大倾角为 45° ;

H ——采挖深度, m。

链斗式采矿船实际上是一种漂浮在海面上的采矿与选矿的联合工厂, 其生产工艺流程包括采矿和选矿两部分。

采矿部分的主要工作是挖掘和提运。绕斗架循环运转的斗链中的挖斗自水下挖取矿砂, 并把它提运到采矿船上, 当装满矿砂的挖斗经过主滚筒时产生自动翻转, 把矿砂卸入受矿漏斗。矿砂借自重从受矿漏斗溜入圆筒筛。

由于圆筒筛向船尾倾斜一定角度和圆筒筛不停地转动, 使矿砂不停地向船尾运动, 同时受到圆筒筛内高压水流的冲洗, 使矿砂中的泥块冲散, 冲洗掉粘附在砾石上的游离矿物。大于筛孔的砾石由砾石溜槽或胶带式砾石排弃机排入船尾的采空区。小于筛孔的矿砂和水一起通过筛孔落入筛下的分配器中, 再分配给选矿设备进行分选, 所得精矿暂时贮存在船上的精矿仓, 尾矿经尾矿溜槽排入船尾的采空区。精矿仓的精矿采用沙泵或其他输送设备转送到专门的运输船并运至指定地点。

链斗式采矿船的基本特点是:

①挖掘力大, 能开采不同类型的海滨砂矿。

②连续作业, 效率高, 成本低, 可用于开采低品位砂矿。

③采选结合, 就地(在采矿船上)选出精矿, 节省运输费用。

④如砂矿上覆盖其他沉积物, 可利用链斗式采矿船自身进行剥离。剥离超前采矿一个较短的距离, 轮流地进行剥离和采矿。

⑤链斗式采矿船多用于开采靠近海岸的、海水深度不超过 50 m 的浅海海底砂矿。

(4) 吸扬式采矿船开采

吸扬式采矿船是一种由砂泵或泥浆泵产生的吸力, 从海底吸取并提运矿砂的漂浮式采矿设备。该方法结构简单、重量轻, 平稳性好, 适于开采浅海底的重矿物、金刚石、建筑材料等。

吸扬式采矿船可以有各种不同的类型。图 5-18 给出 6 种类型的吸扬式采矿船开采方式。它们分别是: 钢绳式; 桩柱式; 自航式; 直接吸取式; 带松散器方式; 刮砂式。

吸扬式采矿船基本上是借助水力完成矿砂的采集与提运(图5-19)。其采掘装置由矿砂吸取装置、水力运输管道和砂泵等设备组成。根据需要采矿船上可设计带或不带洗选厂。如果开采地点离岸较近时,用浮管直接输送上岸,否则还要借助驳船完成运输。近年来,为了提高风浪条件下的稳定性,研制了利用铰链补偿器使吸管架能随波浪起伏而伸缩的吸扬式采矿船。

吸扬式采矿船的基本工作原

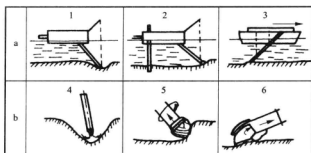


图5-18 吸扬式采矿船的不同类型

1—钢绳式; 2—桩柱式; 3—自航式;
4—直接吸取式; 5—带松散器方式; 6—刮砂式

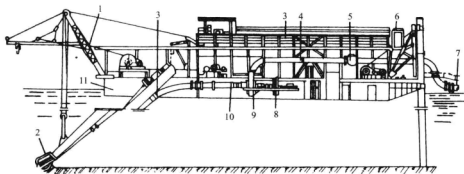


图5-19 吸扬式采矿船基本构成

1—船舶吊架; 2—松散器; 上部结构; 4—输浆管; 5—方向阀; 6—变压器;
7—输浆浮管; 8—砂泵电机; 9—砂泵; 10—吸管; 11—平底船

理是利用砂泵在管内产生的负压,并使吸管末端周围的海水在管外海水静压和大气压的作用下以一定的流速进入吸管,当该流速大于矿石冲采速度时,便实现了采矿。图5-20是吸管末端水流速度分布及吸入矿粒示意图。

判断矿粒能否被吸入管内的标准是吸管末端的水流速度 v_p 是否大于矿粒的冲采速度 v_c 。其计算公式如下:

$$v_p = \frac{v_{BC} \pi D_s^2}{4 L_s h_c}$$

式中: v_{BC} ——吸头附近的流速, m/s;

D_s ——吸管内径, m;

L_s ——吸管周长, m;

h_c ——吸管与工作面的间隙高度, m。

矿粒的冲采速度 v_c , 前苏联学者给出的经验公式为:

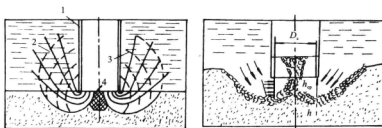


图 5-20 吸管末端水流速度分布及吸入矿粒示意图

1—吸管；2—流线；3—等速线；4—一流区

D_p —管径； h_p —吸管到工作面之间的距离； h —吸管至可冲采矿层的深度

对均匀砂：

$$v_c = \sqrt{\left(14d_p + \frac{5}{d_p}\right)}, \text{ m/s}$$

式中： d_p ——矿砂颗粒平均粒径，m。

对不均匀砂：

$$v_c = \sqrt{\frac{1}{100} \sum P_i \left(14d_i + \frac{5}{d_i}\right)}, \text{ m/s}$$

式中： P_i ——某粒径的含量，%；

d_i ——与 P_i 对应的粒径，m。

吸扬式采矿船的吸取矿砂的能力主要取决于矿砂的松散性和吸管末端的水流速度。实践表明，最有利的条件下开采松散砂矿的水流平均速度建议取 1.4~2 m/s。

为了克服用吸管直接吸取矿砂的效率很低的缺点，差不多所有的吸扬式采矿船都在吸管入口安装了矿砂松散器。松散器根据其工作原理分为：

①利用淹埋水射流的能量散碎矿砂水力松散器 (图 5-21, 图 5-22)；

②借助转动的绞刀切割与绞碎砂矿石，并将绞碎的矿石导入吸管的机械绞刀松散器 (图 5-23)；

③利用水下斗轮式挖掘机挖取矿砂，并直接送入砂泵的吸管的斗轮式松散器；

④刮砂器 (图 5-24) 等。刮砂器与吸管以铰接方式连接，以保证刮砂器底面能全部与砂矿层接触。刮砂器上纵横钢条制成的格筛则能有效防止大块砾石进入吸管。

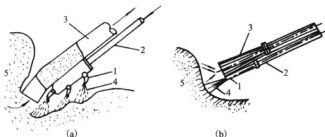


图 5-21 简单型水力松散器

(a) 带多个喷嘴的水力松散器；(b) 带一个喷嘴的水力松散器

1—喷嘴；2—供水管；3—吸砂管；4—高速水射流；5—砂矿

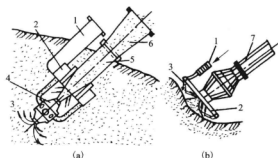


图 5-22 复杂型水力松散器

(a) 带射流泵的水力松散器; (b) 带导流环的水力松散器

1—供水管; 2—环形分流器; 3—松散喷嘴; 4—射流喷嘴; 5—混合器; 6—扩大器; 7—吸管

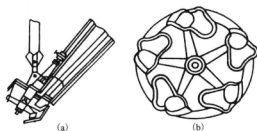


图 5-23 绞刀型松散器

(a) 开式松散器; (b) 闭式松散器

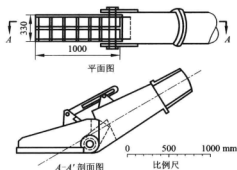


图 5-24 刮砂器

如图 5-25 所示, 吸扬式采矿船的开采方法, 按其工作面的推进方式和形状分为: 纵向平行条带采矿法、横向平行条带采矿法、环形条带采矿法及扇形条带采矿法。

吸扬式采矿船开采的几个主要采挖参数:

①采挖深度——海面到采坑底板距离。

最大采挖深度:

$$H_{\max} = H_B - \frac{v_B^2}{2g} - \sum h, \text{ m}$$

式中: H_B ——砂泵的真空度, m;

v_B ——吸管中的流速, m/s;

g ——重力加速度, m/s²;

$\sum h$ ——吸管中的阻力损失之和, m。

②采挖宽度——一次采挖矿石的宽度。与采矿船的移行方式有关。

③采矿船单次移动距离, 用 a 表示——取决于松散器的工作长度。对于绞刀式松散器而言, 有:

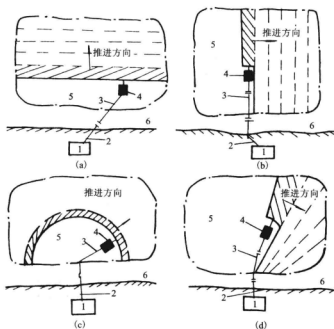


图 5-25 吸扬式采矿船开采方法示意图(选厂设在岸上)

(a)纵向平行条带法; (b)横向平行条带法; (c)环形条带法; (d)扇形条带法

1—选厂; 2—岸上干管; 3—浮管; 4—采矿船; 5—已采区; 6—海岸线

$$a = L_d \eta_d \cos \alpha, \text{ m}$$

式中: L_d ——绞刀的长度, m;

η_d ——绞刀长度的利用系数;

α ——桥架或吸管的倾角($^\circ$)。

④生产能力

$$Q_T = \rho_j Q_j M_j$$

式中: Q_T ——采矿船的矿石生产能力, kg/s;

Q_j ——砂泵的矿浆流量, m^3/s ;

M_j ——矿浆的质量浓度, kg/kg;

ρ_j ——矿浆的密度, kg/m^3 。

(5)气升式采矿船开采

气升式采矿船开采的基本原理是: 将压缩空气从潜没在海水中的管道底部注入其中, 与管中的海水混合, 并在吸管底部的管内产生一定压差。吸管底部附近的海水在管外压力作用下流入吸管, 并在吸管口产生吸力, 矿砂被吸入后, 管内形成固气液三相流, 实现矿砂吸取与提运。该方法结构简单, 工作可靠性高, 可开采水深 30 ~ 100 m 的海底矿产资源。

气升式采矿船主要包括直接吸取式和带水力松动的两种类型(图 5-26、图 5-27)。

①直接吸取式气升式采矿船。

船上的压缩空气机产生的压气经风包和送气管道送入提矿管道的底部, 由它产生吸力, 直接从矿层表面吸取矿砂, 并运送到船上。吸力小, 只适合开采较松散的砂矿。

②带水力松动的气升式采矿船。

采矿时,同时启动装在水泵和空气压缩机,水泵产生高压水经供水管送入喷嘴,由它产生的高压水射流松动矿砂。由压缩机产生的压气经内管送至提升管底,由它产生的压力将已松动的矿砂吸送到采矿船上处理。因装有水力松散器,可用于开采较致密的砂矿。

(6)钢索式采矿船开采

钢索式采矿船开采是由悬系于钢索上的采掘工具构成的采矿船。采矿时,先将采矿装置投入海中被采矿床的表面,以抓挖或拖刮的方式采挖矿砂,然后由船上的提升绞车将装满矿砂的抓斗或拖斗提升到采矿船上洗选,或运输到驳船上,再将矿砂运往岸上处理。

图5-28为日本八幡钢铁公司用于开采有明湾海底磁铁矿的抓斗式采矿船。抓斗容积 8 m^3 ,船长 40 m ,宽 14 m ,吃水深度 2.7 m ,船上装有磁选和重选两套设备,月生产钛铁矿 3万 t 。

抓斗是采掘装置的重要组成部分,种类较多。常用的是两壳瓣的蟹钳型抓斗(图5-29)。斗唇根据需要可设计成带齿或不带齿。

(7)拖斗采矿船开采

拖斗采矿船开采法是开采深海锰结核最简单的方法(图5-30)。深海拖斗采样船最大取样深度可达 $9\,000\text{ m}$ 左右。

该开采系统的基本构成为:采矿船(装备有采矿用绞车、发电机组、采矿和受矿等装置、生活设施等)、机动驳船(装备洗选设备、贮矿仓、精矿转运设备等)、拖斗、钢缆等。

整个生产过程大致是:

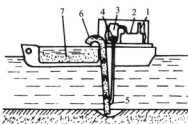


图5-26 直接吸取式气升式采矿船
1—进气管;2—压缩机;3—风包;4—压气输送管;5—进气口;6—提矿管道;7—采矿船

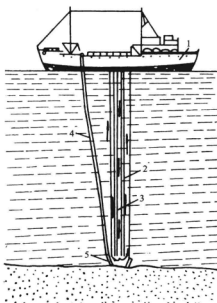


图5-27 带水力松动的气升式采矿船
1—采矿船;2—提升管道;3—压气管;4—供水管;5—喷嘴

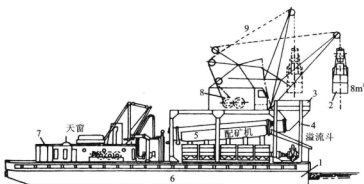


图 5-28 抓斗式采矿船

- 1—平底船；2—抓斗；3—受矿漏斗；4—溢流管；5—选矿装置；
6—重选设备；7—磁选机组；8—提升绞车；9—悬吊钢绳

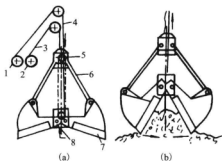


图 5-29 蟹钳型抓斗

(a) 抓斗组成系统；(b) 抓矿过程

- 1—闭斗和提升绞车；2—开斗绞车；
3—开采和吊斗钢绳；4—提升和闭斗钢绳；
5—抓斗头部；6—闭斗臂；7—斗唇；8—中央铰链

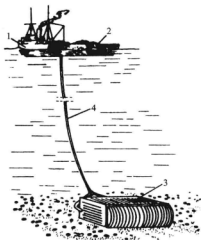


图 5-30 深海拖斗采矿船开采示意图

- 1—采矿船；2—机动驳船；3—拖斗；4—钢绳

拖斗船开采是间歇性生产过程，其小时生产能力 Q_t 按下式计算：

$$Q_t = \frac{3600EK\rho_m}{t}$$

式中： E ——拖斗的容积， m^3 ；

K_e ——拖斗装满系数，一般为 0.65~0.8；

ρ_m ——锰结核的密度， t/m^3 ；

t ——采挖的周转时间，s。

为提高拖斗采矿法的工作效率，变单拖斗为双拖斗，采矿时，一边提升满载拖斗时，一边放下卸载拖斗，如此有望将生产能力提高一倍。

(8) 连续绳斗采矿船开采

连续绳斗采矿船开采也称 CLB 法 (Continuous Line Bucket System), 由日本人于 1967 年提出 (图 5-31)。

该系统由采矿船、无极绳斗、绞车、万向支架等组成。无极绳斗上每隔一定距离 (25~50 m) 便安设一个铲斗, 它集采矿与矿石提升为一体。绳索用高强度尼龙或聚丙烯材料制成 (抗拉强度达 7 500 MPa)。绳索长度不小于海水深度的 2.5 倍。

为克服单船作业时, 两根钢绳离得太近, 易使绳斗缠绕问题, 一般采用双船作业 (图 5-32)。一条船出绳入海, 另一条船将满载的铲斗从海中收进, 卸载后将空铲斗传递给第一条船。如此循环往复, 实现连续作业。

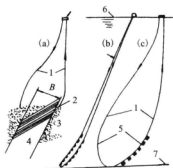


图 5-31 单船作业的 CLB 法示意图

(a) 平面图; (b) 正面图; (c) 侧面图

1—绳斗; 2—铲斗轨迹; 3—未采区; 4—采空区;

5—海底部分绳斗; 6—海面; 7—海底

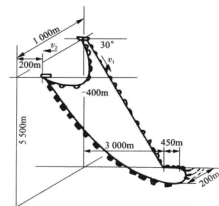


图 5-32 双船作业的 CLB 法示意图

CLB 系统单位时间内采取的锰结核量 (Q_n , t/d) 由下式计算:

$$Q_n = \frac{EK_s T \eta V_L \gamma}{K_s L}, \text{ t/d}$$

式中: E ——铲斗容积, m^3 ;

K_s ——铲斗装满系数;

T ——工作时间, 86 400 s;

η ——时间利用系数;

V_L ——绳斗的运转速度, m/s ;

γ ——锰结核矿的容重, t/m^3 ;

K_s ——锰结核矿的松散系数;

L ——铲斗间距, m 。

(9) 流体提升式采矿船开采

流体提升式采矿船是利用流体动力学原理提升锰结核的采矿船。它主要由集矿机、水中提矿系统、船的定位装置、遥控及操作系统和具有海上航行能力的船只组成 (图 5-33)。船上还装备有洗选设备、矿核转运设备、提升集矿机和管道的绞车、动力装置, 以及生活设

施等。

流体提升式采矿船开采系统的生产过程大致为：

海底锰结核

↓
集矿机

↓
提矿系统

↓
洗选等处理

↓
精矿贮存及转运

集矿机的主要功能是聚集锰结核、洗泥初选、破碎大块锰结核、并将集中和初步处理过的矿石送到提矿管道。

对集矿机的基本要求是：

- ①结构简单、可靠性高；
- ②灵活和适应能力强；
- ③集矿效率高；
- ④自动监控；
- ⑤集矿时少污染海底环境。

集矿方法主要有机械集矿方法（利用刮板、刮刀进行

刮集；或用斗轮、链斗等进行耙集）、水力集矿方法（利用高速水射流产生的卷吸作用，把锰结核送入集矿机）、磁力集矿法和机械水力联合集矿法（图 5-34）。

下面介绍几种实际应用的集矿机。

①磁力集矿机。

如图 5-35 所示，磁力集矿机的主要组成部分为拉杆 1、带齿的圆鼓 5 及成 90°布置的永久磁铁 4。

集矿时，拉杆 1 作水平运动，圆鼓 5 则作顺时针转动，圆鼓上的齿 6 将锰结核 9 掘起，并在永久磁铁 4 的作用下被吸附在圆鼓外缘的齿 6 之间。

关键是永久磁铁 4 被设计成始终保持在 ab 的位置不变，因此，磁力从 a 点开始，往上逐渐降低，到吸入口 10 时，磁力已基本消失。此时，失去附着力的锰结核恰到好处地被提升管 11 吸入其内，并由提矿管道提运到海面上的采矿船上。

②拖曳式水力集矿机。

如图 5-36 所示，拖曳式水力集矿机主要由移行装置、结核采集装置、筛分破碎装置等组成。

该集矿机外形尺寸 12.9 m（长）×4.6 m（宽）×5.0 m（高），空气中重 318 kN，水中重 105 kN。撬板接地面积 34.9 m²，总功率 83.2 kW，可在 5 000 m 深的海水下进行采矿作业。

③布罗克特集矿机。

布罗克特集矿机也是一种拖曳式水力集矿机，其集矿装置部分如图 5-37 所示。

集矿机由海面上的采矿船借助提矿管道拖曳而行，水泵产生的高压水经控制阀 6 和供水

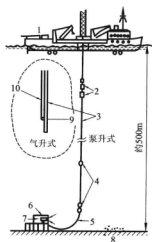


图 5-33 流体提升式采矿船开采系统示意图

1—采矿船；2—泵；3—提升管道；
4—测试线柱；5—挠性管；6—集矿机；7—海底电源；8—锰结核；9—注气孔；10—压气管

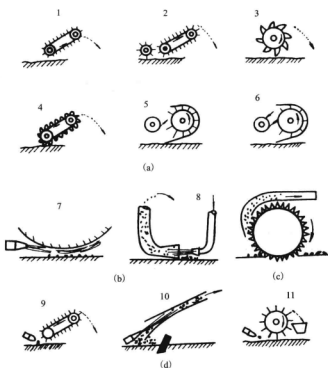


图 5-34 机械集矿和水力集矿方式

(a) 机械集矿法; (b) 水力集矿法; (c) 磁力集矿法; (d) 机械水力联合集矿法

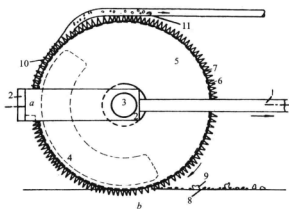
 1—挂板式; 2—带前轮的瓜板式; 3—斗轮式; 4—链斗式; 5—针轮式; 6—刷轮式;
 7—水力吸入式; 8—水力冲吸式; 9—刮板与射流式; 10—刮刀与射流式; 11—针轮与射流式


图 5-35 磁力集矿机(美国专利)

 1—拉杆; 2—框架; 3—转轴; 4—永久磁铁; 5—圆鼓; 6—齿;
 7—圆鼓凸缘; 8—海底; 9—铍结核; 10—吸入口; 11—提升管

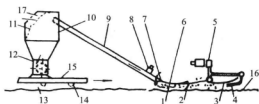


图 5-36 拖曳式水力集矿机

- 1—大块格筛；2—主喷嘴；3—弧形导板；4—辅助喷嘴；5—水泵；6—吸矿头；
7—旁路阀门；8—卸压阀；9—导管；10—分离仓；11—格筛；12—破碎机；
13—紧急卸矿阀门；14—紧急注水阀门；15—排矿管；16—海面；17—带洋泥的溢流水

管操纵阀 7，向左右供水管 5 供水，并分送给各个喷嘴 9。喷嘴喷出高速水射流并产生吸力。海底上的锰结核等被吸送至导箱 16 之中。锰结核和海水的固液两相流在沿导箱 16 上升的过程中，流速逐渐降低，当两相流达到分选筛 12 时，水流的速度只能将细颗粒的沉积物带出分选筛并排弃海水中，而较大颗粒的锰结核则沉落在分选筛 12 之上。凡粒径小于筛孔直径的将落入输送装置 13，并由它将结核矿输送给排矿管 14，最后由提矿管道提运至采矿船上。未能通过分选筛的大块锰结核将在水流作用下滚落海底。为防止特大锰结核损伤和堵塞集矿装置，在集矿机前方安装了超大块挡板 11。

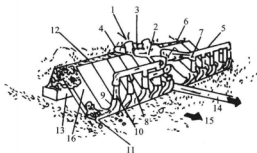


图 5-37 布罗克特集矿机主部件

- 1—进水口；2—水泵；3—备用泵；4—主马达；5—供水管；
6—中央操纵阀；7—供水操纵阀；8—喷嘴操纵阀；9—喷嘴；
10—挠性导管；11—超大块挡板；12—分选筛；13—输送装置；
14—排矿管；15—移行方向；16—导箱

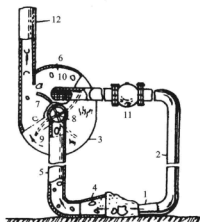


图 5-38 冲吸式水力集矿机（美国专利）

- 1—喷嘴；2—供水管；3—泵；4—吸入口；5—吸入口管；
6—泵壳；7—叶轮；8—轴；9—泵室入口；
10—筛网；11—阀门；12—提升管

④冲吸式水力集矿机。

该集矿机的关键部件是泵 3（图 5-38），它既担负输送锰结核的任务，又担负向集矿作业供水任务。

泵 3 产生的高压水经阀门 11 和供水管 2 供给喷嘴 1。喷嘴 1 喷出的高速水射流把海底分

散的锰结核冲集到吸矿口4。由于泵3在吸入管5中产生的负压,使吸入口4中的锰结核随海水一起进入泵室,然后由泵3经提升管12举送到采矿船上处理。

由于从吸矿口流进泵室的矿浆浓度较低,一般只有10%左右,因而采用在泵3中放出一部分水供集矿用的方法,可提高矿浆输送浓度,即可提高该系统的生产能力。为防止锰结核进入供水管2,而设置了筛网10。

⑤洛克希德集矿机。

洛克希德自行机械式集矿机主要由两台阿基米德螺旋桨1、链耙式集矿装置2和电视摄像与侧扫声呐监控装置3组成(图5-39)。

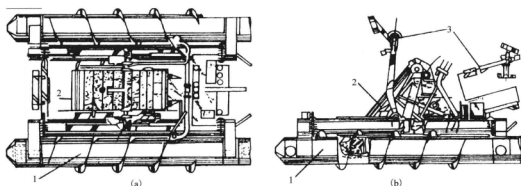


图 5-39 机械式集矿机——洛克希德集矿机

(a) 洛克希德集矿机俯视图；(b) 洛克希德集矿机侧视图

1—阿基米德螺旋桨；2—链耙式集矿装置；3—电视摄像与侧扫声呐监控装置

如图5-40所示,链耙式集矿装置中的链耙3绕托架10循环运转,耙斗4挖取锰结核并送到受矿漏斗5,大块锰结核在破碎机6中处理后进入集矿仓7,最后经吸矿管9提运至采矿船上处理。

洛克希德自行机械式集矿机上还装有由侧扫声呐、定位声呐和电视摄像等组成的监控系统(图5-41),主要用于监视集矿机的工作状态,控制集矿机的工作路线。

⑥水力—机械集矿机。

图5-42为日本研制的水力—机械联合型集矿机,外壳上装有马

达、水泵、格筛和富集装置等。内机壳上装有刮刀、喷嘴和导管等。内外机壳之间用挠性铰链连接,并搭载在撬板上,以减少对海底的压强。

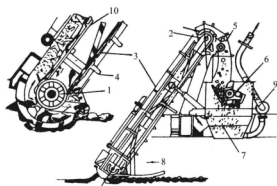


图 5-40 洛克希德集矿机上的集矿装置

1—导向轮；2—驱动轮；3—链耙；4—耙斗；

5—受矿漏斗；6—破碎机；7—集矿仓；

8—移行方向；9—吸矿管；10—链耙托架

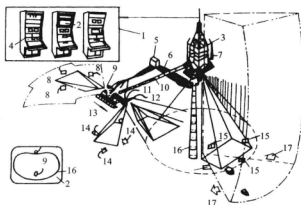


图 5-41 洛克希德集矿机上的监控设备

- 1—集矿机控制中心；2—荧光屏；3—缓冲装置；4—控制台；5—浮力块；6—挠性连接机构；7—护板；
8—电视摄像扫描方向；9—集矿机；10—前伸臂；11—前电视摄像机；12—照明灯；13—集矿机运行方向；
14—电视摄像机扫描方向；15—电视摄像机；16—集矿机工作范围；17—侧扫描声呐扫描方向

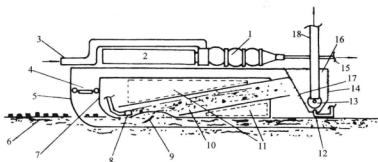


图 5-42 水力—机械集矿机

- 1—水泵；2—马达；3—吸口；4—挠性铰链；5—外壳；6—锰结核；
7—内机壳；8—集矿喷嘴；9—刮刀；10—导管；11—浮体；12—富集喷嘴；13—螺旋输送机；
14—小孔筛；15—供水管；16—富集室；17—大孔筛；18—排矿管

5.7 海底提升系统

深海锰结核开采的关键技术之一是把集矿机聚集起来的锰结核从几千米深的海底提升到采矿船上。就提升方法的实质而言，主要分为水力提升法（泵升法）和轻介质提升法。其中水力提升和气压提升最有应用潜力。

水力提升法根据所用提升泵的种类，分为砂泵（泥浆泵）提升或潜水泵提升。其基本原理是泵使提升管中的海水产生流动，当其上升的流速大于锰结核的沉降速度时，锰结核则随水流一起上升，使锰结核搬运至采矿船上。

（1）砂泵（泥浆泵）提升

砂泵（泥浆泵）提升系统由采矿船、提升管道、砂泵、集矿机或吸头以及监控装置等组成

(图 5-43)。砂泵应安装在适当深度的海水中,既满足提升锰结核的要求,又方便砂泵的检修。一个砂泵不能胜任结核的提升时,则应考虑多级砂泵站串联使用。砂泵及电机一般安装在主浮筒内。

砂泵提升法生产效率较低,提升高度受限制,难以满足大规模开采深海锰结核的要求。

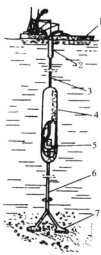


图 5-43 砂泵提升系统示意图

1—采矿船；2—稳浮标；3—排矿管；4—主浮筒；
5—砂泵及电动机；6—吸矿管；7—吸头

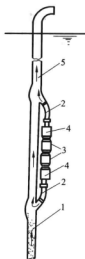


图 5-44 潜水泵提升法示意图

1—吸管；2—连接软管；3—深水电机；
4—潜水泵；5—排矿管

(2) 潜水泵提升

水泵提升系统主要有 4 种方法：

- ① 潜水泵提升法(图 5-44)；
- ② 压水提升法[图 5-45(a)]；
- ③ 射流泵提升法[图 5-45(b)]；
- ④ 双管室提升法[图 5-45(c)]。

潜水泵提升法由设在海水中的潜水泵站完成锰结核的提升。为平衡潜水泵的轴向推力,两台潜水泵吸入口与排出口反向布置,深水电机位于两台潜水泵之间。

潜水泵与提升管路之间用橡胶软管连接,可隔绝彼此间的受力状态。深水电机与潜水泵之间一般为刚性连接。潜水泵站一般设在 1 000 m 以下的海水中。如果需要,可设置两个或两个以上的潜水泵站。

压水提升法的提升管道是一种同心管道,在中心管道上安装提升泵来产生负压,并使海水和锰结核沿中心管被吸取和提升至采矿船上的贮水箱,经分离,海水经内外套管间隙回流海底,而锰结核经专门放矿装置进入贮矿舱。

射流提升法则依靠安装在海底或船上的水泵产生高速水射流,使吸矿管中产生负压并形成对锰结核的吸取和提升能力。

双管提升法的具体做法是在提升管道的适当位置设置双管装置,在下端安装压力泵,在

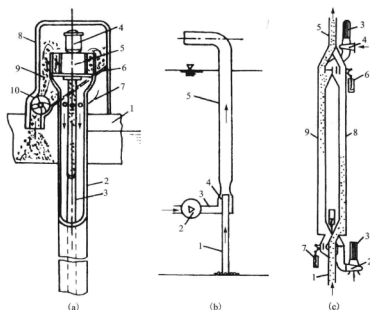


图 5-45 压水提升法、射流提升法和双管室提升法

(a) 1—船体；2—外套管；3—内套管；4—电机；5—泵；6—筛网；7—进水机；8—贮水箱；9—锰结核；10—放矿装置；(b) 1—吸管；2—水泵；3—供水管；4—射流装置；5—排矿管；(c) 1—吸管；2—压力泵；3—电机；4—抽吸管；5—排矿管；6、7—换向阀；8、9—支管

上端安装抽吸泵，利用转换装置使它们同时作用在不同的支管，在推和吸的作用下实现对锰结核的吸取与提升。

5.8 其他海洋开采方法

除了前面介绍的各种海洋开采方法以外，还有潜水式采矿船开采法、飞艇式采矿船开采法及梭车式采矿船开采法等。

(1) 潜水式采矿船开采法

潜水式采矿船相当于装有集矿装置的潜水器，它兼有矿石采集和运输作用。其基本原理是：在开采锰结核之前，先装满压舱物。潜水采矿船借助其自重沉入海底，并沿海底采集锰结核，当采集的锰结核装满船舱时，抛弃压舱物，装满锰结核的潜水采矿船就可浮出海面，卸入洋面的船上，进入下一次采矿循环。

(2) 飞艇式采矿船开采法

飞艇式采矿船由浮力罐、贮矿舱、动力及操纵装置等组成(图 5-46)。在进行采集锰结核之前，注满压舱水并向浮力罐中充好压缩空气。船借自重沉入海底并进行锰结核采集，当完成采集工作时，利用浮力罐中压缩空气的膨胀排出压舱海水，载满锰结核的船在浮力作用下浮出海面，卸矿后进入下一次采矿。

(3) 梭车式采矿船开采法

梭车式采矿船开采系统包括母船、中间平台和梭车式集矿机和辅助式推进器组成(图5-47),它可以潜入海底6 000 m进行采矿。梭车式集矿机是一种无缆、无人驾驶,采用高能蓄电池为动力,遥控操作的锰结核采集潜水器,海底可用履带行走,或用螺旋桨在水中潜行完成一次采矿的基本流程是:梭车式集矿机由母船装满压舱物,靠自重沉入海中,接近海底时,先卸去部分压舱物,以减少下沉速度,保证集矿机轻轻接触海底,一边采集矿石,一边抛弃压舱物,直至满载,依靠浮力与助推器上浮到母船并卸矿。

从上述潜水采矿船系统可以发现,它们的最大优点是摆脱了电缆和管道的约束,不需要长距离的输送管道和提升设备,因此,具有更好的机动灵活性。但整个系统对设备的制造技术和自动控制等方面的要求相当高,造价不菲。另外,由于集矿机下沉与上浮都需要较长时间,因此,生产能力受到一定限制。还有,廉价的压舱物来源有限,同时压舱物抛弃海底也会污染海底环境。

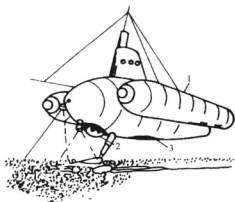


图 5-46 飞艇式采矿船

1—浮力罐；2—操纵室；3 贮矿舱

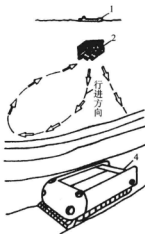


图 5-47 梭车式采矿船开采系统

1—母船；2—中间平台；3—梭车式集矿机
4—辅助式推进器

5.9 海洋采矿与海洋环境保护

5.9.1 影响海洋环境的主要因素

海洋环境问题是伴随着人类开发利用海洋而产生的。海洋形成已有亿万年了,人类利用海洋已有几千年的历史,但是并未发生严重污染问题,就是因为海洋对有害物质有自净能力。但是海水的自净能力是有限的,随着人类开发利用海洋向深度和广度进军,人类对海洋环境的影响越来越大。人类的生产建设措施已经和自然因素一起,成为影响和改变海洋生态环境的一个因素。20 世纪 50 年代以来,人类的生产力水平有明显的提高,排放的污染物大大增加,对海岸的破坏和影响也越来越严重,加上海底矿产资源开发利用力度和规模的不断

增大,使得海洋环境问题越来越突出、形势越来越不容乐观。

(1)以陆地为污染源的海洋污染物

①石油进入海洋形成油膜,污染海洋、破坏海洋生态。偶发性的海上石油平台和油轮事故,引起石油渗漏和溢出造成海洋污染。

②重金属物质流入海洋后,逐渐在鱼和贝类体内富集。通过食物链,最终进入人体,导致人严重中毒死亡。1953—1970年,日本九州岛“水俣湾”发生的汞污染事件,就是因为工厂在生产有机产品过程中,排出含有汞的废物造成的。

③核电站和工厂排出的冷却水,水温较高、流入河口或海中时,往往给海洋生物带来影响。

④施入农田的杀虫剂随雨水流入河流、或者随土壤颗粒在河口附近淤积,最终进入海洋。

(2)海洋资源开发利用对海洋环境产生的影响

①由于人们对矿物燃料特别是石油的需求量不断增加,海洋石油开发和运输迅速发展,海洋中石油溢出事件无疑会更加频繁,石油污染将是一种持续的海洋污染现象。20世纪60年代末,随着海洋石油运输业的飞速发展,油轮溢油事件开始频繁发生。时至今日,恶性的油轮溢油事件仍时有发生。在海洋石油开采活动中,石油的自然渗出、偶然发生的井喷、油污排泄等,也可能造成油溢。

②沿海工业生产和海运航线上的船舶,是海洋石油污染的主要来源。因此,石油污染区域集中于沿海水域和海上航道沿线。为减少意外事故的发生,很多国家在试验新的原油载运方法。有些国家配备了除污船,用来清除港口水面垃圾和油污。

③像围海造田、港口建设等工程周期一般为几年到十几年,这种短时期内对局部海岸的激烈改造,必然导致区域海洋生态系统发生改变。

④人类对某些传统经济鱼类的过度捕捞,往往导致这些资源数量减少,质量下降,并进而导致部分非经济生物由于天敌锐减而大量繁殖。从而导致海洋生态失去平衡,海洋环境遭到破坏。

⑤海洋矿产资源的开发利用对环境的影响主要来自海底资源的开采、采矿船上废水排放及岸上加工的环境影响,其中海底采矿活动的影响最为严重。

5.9.2 海洋采矿对海底环境的影响

根据相关试验结果及资料分析,深海采矿对上层环境,如悬浮颗粒物增加、光衰减、冷的底层水与表层水混合、表层水中营养盐、痕量金属(痕量金属,就是指含量极少的金属。在痕量分析里,是指浓度在百万分之一以下)、海水密度等都有一定影响,但是不足以危及上层生态系统。尽管这些结果是令人欣慰的,但由于这些试验的规模和持续的时间是十分有限的,并不能完全真实地评估深海采矿对海洋生态系统的潜在影响。

21世纪是人类开发利用海洋的世纪。深海海域作为人类最后一片未开发区域,蕴藏着丰富的资源,成为世界各国争取海洋权益、发展高新技术、开展国际合作及展示自身实力的重要场所。

海底热液矿床是近年来颇为引人注目的深海资源,在世界大洋水深数百米至3 500 m处均有分布。它主要出现在2 000 m深处的大洋中脊和地层断裂活动带,是具有远景意义的海

底多金属矿产资源,主要元素为铜、锌、铁、锰等,另外,银、金、钴、镍、铂等也在一些地区达到工业品位。这些富含硫和金属的海底热液矿床,由分布于世界各地水下火山区域的“黑烟囱”生成。所谓“黑烟囱”,就是当含有矿物质的热水出现在热液口时,与周围的冷水混合迅速变冷,使得许多矿物质硬化,在热液口周围逐渐形成的一种像烟囱一样的结构,这里的“烟”实际上是矿物颗粒形成的浓云。

人类在海洋地质学和深海技术方面取得的进展,让人们觉得去几千米的水下采矿,可能比到几千米的岩石下采矿更容易,这将使 2 000 m 以下海底采金或开采其他稀有资源成为现实。

目前,最深的海底采矿是位于南非附近的钻石矿开采,深度也就几百米。斯考特博士认为,海上石油和天然气工业为海底采矿提供了借鉴。20 世纪 40 年代中期,石油和天然气工业就开始了海上开采。如今,世界上 1/3 的石油来源于海上开采。在巴西海域,正在生产的油田的深度是 1 500 m;而在墨西哥湾,正在钻探 2 500 m 深的油田。

海底采矿中的关键问题之一是如何运送海底矿石。使用深海型的自动采煤机器人,将矿石通过管道传送到采矿船或海上采油使用的半下潜式平台,就能够解决矿石的运送问题。由于 20 世纪七八十年代,国际上投入了 6 亿多美元用于海底锰结核矿开采技术的研发,深海采矿技术得到了很大发展,而且深海机器人已经是成熟的工业技术,广泛使用于海上石油开采和海底搜救中。

一般认为海底采矿对环境的影响比陆地采矿要小。海底采矿可以避免陆地采矿带来的许多问题。比如,海底采矿不存在排放酸性污水的问题,因为碱性海水可以中和酸性污水;由于硫化物沉积物就在海底,所以也无需掘洞开采,不会在海底留下永久性的建筑物;海底采矿也可以通过距离的控制,不触及活跃的黑烟囱,从而不会威胁到活跃黑烟囱附近聚集的各种海底生命。

尽管如此,与其他形式的工业生产一样,海底采矿肯定会引发一些环境问题,比如,集矿线路上对海底生物的搅动与破坏;悬浮沉积物再沉降对海底生物的可能伤害与再生期的延时影响;沉积物中某些化合物的溶解性对海水水质的影响等。因此,采取必要的防范措施,将采矿及运送过程所产生的数量不小的沉淀物对海底生物体的生存环境的污染,控制在尽可能低的水平是应该的。

20 世纪 70 年代末期,“黑烟囱”(图 5-48)的发现让科学家认识到,生命还可以依靠热能和化学能存在,并不一定需要阳光。由于海洋的历史基本等同于地球的历史,这些“黑烟囱”附近的环境可能是地球最古老生命的生存地。科学家认为,除了“黑烟囱”有其科学价值外,生存在其周围的生物体在医药和生物技术方面也具有重要的作用价值。人类有责任和义务采取措施,防止海底采矿对“黑烟囱”产生破坏。

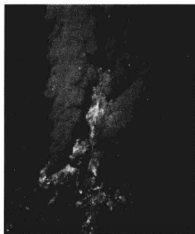


图 5-48 大西洋海底火山喷发出来的二氧化碳气体和沉积岩——“黑烟囱”

5.9.3 海洋采矿对海表环境的影响

海洋采矿对海表环境的影响主要表现在海底油气开采时的油的泄漏及偶然的油井喷发等事故。事实上,海洋油气开采还是新兴的海洋产业,自从开采海洋油气资源以来,人类的国民经济得到了迅速的发展,但历史上的海洋油污事件历历在目,人类为此所付出了沉重的代价(图5-49)。海洋油气开采的成功与否很大程度上取决于该国对油气开采的尖端技术掌握的高度以及管理水平,我们要提倡走一条海洋油气开采与海洋环境保护相结合的可持续发展道路。

此外,采矿过程还会将深海的浓缩营养物提升至海洋表面营养物相对缺乏的区域,引发海洋表面海藻繁殖,从而污染捕渔业赖以生存的水域。通过洋流,营养物将漂流到其他区域,破坏食物链,损坏其他国家甚至公海的生态系统。

深海开采中提升至船上的浆状物,绝大部分为深海海水,仅有10%~20%的为矿物。由于排至海面的深海废水主要由海底水、沉积物、结核碎屑和海底生物等组成,因而具有与海面海水明显不同的物理化学性质,海水温差及其物理化学性质的突变可能导致海底生物和海表某些生物的共同死亡。

对多金属结核与海水的微量金属交换的研究发现,结核碎裂成几十目大小的颗粒,将交换到海水表面,并可能释放出有毒的重金属。

海底采矿废水排放量有限,且能很快稀释下沉,对海表面的影响不是很大。如果将废水由管道注入200 m以下的水中,可以有效地避免废水排放对海表浮游生物的影响。



图5-49 智利工人在清理受到石油污染的海面

5.9.4 海洋采矿对海岸环境的影响

海洋采矿对海岸环境的影响主要表现在:

①近海岸矿产资源开发造成的直接影响。

如果管理不善,规划不合理,都可能导致美丽海岸线的被破坏(图5-50)。

②深海资源开采后在岸上的提炼加工。

深海回采的金属资源,一般都要在陆地上进行火法或湿法提炼加工。火法加工时会产生 SO_2 、 NO_2 、 H_2S 、 CO 等有害气体;湿法时,则会在岸上形成诸如炉渣、尾渣、废水等废弃物。废弃物的排放可以选择陆地或海洋。无机或有机浮选剂排向海洋时,必须经过必要的处理,以达到相关的排放标准。

建筑工程混凝土用砂数量十分巨大。河滨及地下古河道是建筑用砂的重要来源。虽然如此,也不可小看了海滨建筑用砂的价值。美国就把这项资源看作一项重要的现实资源,并对其储量进行了勘查计算;全美拥有普通海砂和砾石资源1 400亿 t 。砾石不但是建筑材料,还是化肥、陶瓷生产不可缺少的“球磨”材料。我国辽东半岛南端旅顺口柏岚子海滨的砾石,一



图 5-50 海岸环境遭破坏的情景

度成为国内外有关厂家争相购买的抢手货。20 世纪 70 年代以来,世界每年开采海滨建筑用砂和砾石的价值,也在 2 亿美元以上。我国改革开放以前,基建规模不大,河沙即可满足需要。90 年代以后,出现了乱挖乱采海沙的问题,已经引起有关政府部门的重视。为了保护海岸稳定和环境的优美,海砂、砾石也不是可以随意开采的。探明可供开采的地点和储量也是必要的。

总之,科学家强调,为了降低海洋开采对海底、海面和海岸的环境破坏,现在就应该采取行动,通过科学和法律的形式,保护敏感的海洋生态环境系统,待开采开始后再进行立法将会非常困难。但同时也认为,由于某些国家行政管理机构在采矿管理方面纪录不佳,制定海底采矿法规的前景不容乐观。

5.10 国际海洋公约与海洋资源共享

在人类即将进入海洋世纪的时候,世界各国越来越重视海洋权益问题。为了保障世界各国拥有平等的海洋权益,联合国于 1982 年 12 月 10 日签订了《联合国海洋法公约》。

世界海洋的管理一直是人类面临的挑战之一。一些临海国家对部分海域有主权要求,一些内陆国家也要求分享海洋。20 世纪 40 年代,世界海洋置于少数霸权国家的控制,60 年代国际形势和国际关系力量对比发生转折,发展中国家反对海洋霸权,争取海洋权益平等。20 世纪 60 年代以来,掀起世界性开发海洋的热潮。海洋的环境问题、领土问题与资源所有权问题一直是国际海洋法会议的主题。

《联合国海洋法公约》1982 年通过,1994 年 11 月 16 日正式生效。1996 年 5 月 15 日我国人大常委会正式批准《联合国海洋法公约》。

海洋法公约的主要内容:

① 144 个沿海国家拥有 12 海里海权,管辖海域面积可外延 200 海里,作为该国的专属经济区,享有勘探、开发、利用、保护、管理海床上覆水域及底上自然资源的主权。

② 公海、国际海底资源为人类的共同继承财产,国际管辖共享。

《联合国海洋法公约》的诞生,为建立国际海洋法律新秩序迈出了重要一步。但是,因为《联合国海洋法公约》要兼顾各个国家的利益和要求,还有许多不完善和不明确之处。例如,

在封闭或半封闭的海域(例如黄海),周边国家主张的 200 海里专属经济区就可能存在着重叠,另外还有一些岛屿主权争议和渔业资源分配等问题,这些都有可能成为相邻国家关系紧张,甚至引发国际冲突的新的因素。因此,相邻国家间管辖海域划界和海洋权益,要求有关国家本着友好协商的精神,予以公平合理的解决。

按 12 海里领海宽度计算,我国内海、领海共 37 万 km^2 ,属我国管辖的海域面积约为 473 万 km^2 ,相当于陆地面积的 1/2。所以,我国不仅是一个陆地大国,而且是一个海洋大国。海疆北起鸭绿江口,南至曾母暗沙,东起钓鱼群岛,西至北仑河口。我国大陆海岸线 18 000 多 km,岛屿 6500 多个,东临渤海、黄海、东海、南海,台湾岛以东面临太平洋,其中渤海是我国内海。我国岛岸线总长 14 000 km,陆岸线和岛岸线总长度为 32 000 km。我国沿海地区的国民生产总值占全国 60% 以上,人口占全国的 40%,全国一半左右的大中城市分布在这里。

日本人的海洋国土观念十分突出,从一个小的例子就能清楚地看到这一点。在日本琉球群岛以东的太平洋海域,有一个无人居住的小岛——冲之鸟岛,由于海水的长期侵蚀,露出海面的岩礁逐年缩小,涨潮时只有 2 块礁石露出海面不足半米,不要太久,就会被海水彻底淹没,日本政府不惜投资巨款 300 亿日元,1987 年起用 3 年时间加固该岛。日本这样做的结果,不仅保住了小岛作为领土的法律地位,而且拥有了 126 000 平方海里(相当于 4 个浙江省面积之大)的专属经济区和随之带来的丰富的资源。

中国大多数公民还缺乏比较强烈的海洋意识和活跃的海洋进取精神。不仅内陆和边远地区的人们海洋观念淡薄,就是生活在海边从事涉海行业的人们,也存在着“近海不识海”的问题。长期的封建统治造成了国民守业敬上、偏于内向发展的思想倾向,因而整个国家、民族存在着海洋观念薄弱的一面。与经济发达的海洋国家相比,我们对于某些问题的看法和处理方式表现出明显差距和不应有的淡薄。我们必须转变观念,从《联合国海洋法公约》这一国际法上认识我国的领土。如果说世界处在人口、资源、环境的危机之中,那么这种资源的空间上的压力在我国就显得更为突出。我国人均资源不足,以占世界 7% 的土地养活占世界 22% 的人口,这既是我们引以为自豪的成绩,又是我们必须倍加关心和重视海洋资源与空间开发的迫切理由。我国管辖海域内有着丰富的资源种类和蕴藏量,只有将这种资源优势转化为经济优势,才能使海洋为国民经济和人民生活水平的提高做出更大的贡献。与世界其他海区一样,我国海域也存在着海域划界和岛屿归属的矛盾和争议,必须正确面对。

第6章 盐类矿床开采

6.1 概述

6.1.1 盐矿资源概况

盐矿为 NaCl 的总称, 又称为“盐”、“钠盐”。其代表矿物为石盐。盐的原料来源可分为 4 类: 海盐、湖盐、井盐和矿盐。以海水为原料晒制而得的盐叫做“海盐”; 开采现代盐湖矿加工制得的盐叫做“湖盐”; 运用凿井法汲取地表浅部或地下天然卤水加工制得的盐叫作“井盐”; 开采古代岩盐矿床加工制得的盐则称“矿盐”。由于岩盐矿床有时与天然卤水盐矿共存, 加之开采岩盐矿床钻井水溶法的问世, 故又有“井盐”和“矿盐”的合称——“井矿盐”, 或泛称为“矿盐”。在日常生活中, 习惯上常将氯化钠简称为“盐”。氯化钠除供食用外(惯称食盐), 大量用作化工原料(名曰工业用盐), 国家统计局的统计年表以“原盐”为总称。

中国的盐产量中一直是以海盐为主, 其次是湖盐和井矿盐。由于海盐的生产受气候影响较大, 加之海盐场多分布于东部沿海地区, 为了盐业生产的均衡协调, 近十余年来内地的井矿盐和湖盐生产得到较快的发展, 因此海盐在盐产量中所占的比例有所减小。

盐是世界上利用最普遍的非金属矿物原料, 是人类生存的必需品。随着化学工业的发展和新的应用领域的开拓以及人口的逐年增加, 对盐的需求量越来越大, 因此在国计民生中盐占有相当重要的地位。盐的消耗量是衡量一个国家工业化水平的重要标志之一。中国是世界产盐大国, 以海水为原料生产的海盐居世界第 1 位; 海盐、湖盐和井矿盐的总产量居世界第 2 位, 仅次于美国。

图 6-1 为盐矿石的资料照片。图 6-2 为海盐晶体的资料照片。



图 6-1 盐矿石



图 6-2 海盐晶体

世界盐资源总蕴藏量约为 6.4×10^8 亿 t, 其中海水盐约为 4.3×10^8 亿 t。中国盐资源很丰富, 海岸线漫长, 北起辽宁省鸭绿江口, 南至广西的北仑河口, 途经 11 个省(区、市), 全长 18 000 km; 若将沿海岛屿的海岸线计算在内, 总长达 21 000 km。海水是取之不尽用之不竭的资源, 我国大陆海岸类型以平原海岸为主, 汲取原料海水制盐很方便。此外, 盐矿资源几乎遍布全国各省(区)。

我国盐矿床的主要成盐时代为震旦纪、三叠纪、白垩纪和第三纪, 其次是中奥陶世、早二叠世、侏罗纪和第四纪。

我国盐矿床的分布, 明显受大地构造条件控制, 其时空分布规律, 印支运动是最突出的分界线。

截至 1996 年底, 我国探明盐矿产地 150 处, 保有盐矿储量 4 075 亿 t, 广泛分布于 17 个省(区)。在 1995 年保有储量 4 033.09 亿 t 中, 岩盐矿储量占 18%, 卤水盐矿储量占 0.84%, 湖盐矿储量占 81.16%。

我国最大的岩盐矿产地是四川省犍为县威西盐矿, 保有储量为 174 亿 t; 最大的湖盐矿产地青海省柴达木盆地西部的茫崖镇大浪滩盐矿, NaCl 储量达 1 493 亿 t。

我国最大的盐矿省为青海省, 保有储量占全国总储量的 80%; 此外四川、湖北、云南和江西等省盐矿资源亦极丰富, 省保有储量均大于百亿 t。

我国盐矿资源基本分布状况是: 东部海盐, 西部湖盐, 中部井矿盐。至 1995 年末, 广阔的海疆已建成 44.34 km^2 盐田滩涂, 其中北方海盐区(含辽宁、河北、天津、山东和江苏)为 39.29 km^2 , 南方海盐区(含浙江、福州、广东、广西和海南)为 5.05 km^2 , 当年共产海盐 1 700 多万 t。我国是世界上盐湖分布最多的国家之一, 主要分布于西部, 据统计, 面积大于 1 km^2 的盐湖有近千个, 成盐面积约 6 万 km^2 , 这些盐湖位于东经 $74^\circ \sim 125^\circ$ 、北纬 $28^\circ \sim 50^\circ$ 之间, 大致与现代干旱—半干旱气候带一致, 即分布于新疆、青海、西藏、陕西、甘肃、宁夏、内蒙古、山西等省(区), 含盐地层均为第四系全新统。内蒙古的海拉尔盆地、鄂尔多斯盆地和阿拉善高原, 青海柴达木盆地、西藏羌塘盆地, 新疆准噶尔盆地、吐鲁番盆地和塔里木盆地, 盐湖数量最多, 三省(区)盐湖数约占我国盐湖总数的 80%, 成盐面积约占全国盐湖总面积的 90%。我国面积大、储量丰富的盐湖很多, 如青海察尔汗盐湖, 总面积达 $5\,856 \text{ km}^2$, 以石盐、氯化钾和氯化镁为主的盐类矿产总储量达数百亿 t; 青海昆特依盐湖, 石盐分布面积为 $1\,680 \text{ km}^2$, 估算储量近 200 亿 t; 位于柴达木盆地西部的茫崖镇大浪滩盐湖, 不仅是中国最大的盐矿产地, 而且也是世界上最大的现代盐湖矿产地。

图 6-3 为察尔汗盐湖资料照片。



图 6-3 青海察尔汗盐湖

6.1.2 盐类矿床的矿物组成及其特点

盐类矿床种类很多, 其共同特点是能溶于水。常见的盐类矿床请参见表 6-1。不同的矿物

具有不同的溶解度,它直接影响在溶液蒸发浓缩时,各类矿物沉淀的先后次序。一般而言,碳酸盐类矿物的溶解度最小,因而最先沉淀,接下来是钾、钠的硫酸盐及其复盐,再次为氯化物,最后为钾、镁的氯化物、硫酸盐及其复盐。值得指出的是,这一顺序并非固定不变,由于溶液中盐类物质的含量各不相同,或者沉积时的温度不同,都可能导致上述次序的改变。

表 6-1 常见盐类矿床及其化学组成分子式

盐类矿床		化学组成分子式
氯化物类	岩盐	NaCl
	钾盐	KCl
	水氯镁石	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	光卤石	$\text{KClMgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
硫酸盐类	硬石膏	CaSO_4
	石膏	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	无水芒硝	Na_2SO_4
	芒硝	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	泻利盐	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
复盐类	钾盐镁矾	$\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
	钙芒硝	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$
	杂卤石	$2\text{CaSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	无水钾镁矾	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$
	白钠镁矾	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
	软钾镁矾 $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
碳酸盐类	水碱	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	天然水碱	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
硝酸盐类	智利硝石	NaNO_3
	钾硝石	KNO_3
硼酸盐类	硼矿	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	钠硼解石	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

此外,盐类矿床还具有下述基本特点:

①盐类沉积的一般顺序为:石灰岩或白云岩→石膏或硬石膏→岩盐→钾盐。

②盐类矿物溶解度大,易产生次生变化。地下水可导致盐类矿床的强烈喀斯特化,并使盐类矿层形态不规则。

③盐类矿物可塑性大,易产生变形。当围岩受到轻微的褶曲时,盐层内部将发生十分复杂的褶曲,盐层厚度变化大。构造运动稍微强烈的地域,就可以形成底辟构造,并形成盐丘。

④矿物溶解度的不同,可能导致一些矿物在次生变化中溶失,地表残留很少。

6.1.3 盐类矿产资源分类

根据盐类矿床的不同成因和不同的地质特征,可划分为海盐资源、湖盐资源、岩盐资源和地下卤水矿产资源。以我国为例,分述如下。

(1) 海盐资源

我国近海表层盐度分布的规律是:近岸低、外海高、黑潮区更高。在冬季,渤海表层盐度平均为 31.5‰,其中央区域约为 34‰,沿岸低于 26‰;黄海的表层盐度北部约为 31‰~32‰、南部约为 31.5‰~32.5‰;东海的表层盐度除了长江口地区低于 20.0‰,大部分海区约为 33‰~34‰,黑潮流经的海区达 34.5‰左右;南海的表层盐度大部分海区为 33‰~34‰,局部可达 34.5‰,沿岸为 30‰~32‰;在夏季,渤海整个海区表层盐度平均为 25‰~30‰;黄海为 30‰~32‰;东海从长江口至杭州湾的表层盐度最低可降至 5‰以下,但黑潮区仍达 34‰左右。我国沿海水盐度总的变化情况:渤海和黄海在 26.0‰~31.0‰左右,东海在 24.0‰~32.0‰左右,南海在 27.5‰~34.0‰之间,各河口区域盐度都很低。

我国漫长的海岸线可以分为三个类型:平原海岸,即杭州湾以北的大陆海岸,多由巨厚而松散的沙或淤泥沉积物组成,即基本上属于“基泥质海岸”,适合于兴建大型和中型盐田;港湾海岸即杭州湾以南主要是闽浙两省的大陆海岸,亦称“基岩海岸”,海岸线峡湾曲折,坡陡水深,其间河口地区也分布有平原海岸,多适于建中小型盐田;生物海岸包括珊瑚礁海岸和红树林海岸,多分布于广东、广西、台湾、海南、福建南部、南海诸岛的沿岸,其间也分布有可兴建盐田的平原海岸。

我国海盐分为北方和南方两个产区,北方海盐区位于长江以北的辽宁、河北、天津、山东、江苏,是我国海盐的主要产区,年蒸发量(为 1 500~1 800 mm)大于降雨量(为 500~900 mm),雨量集中在 6 月底至 8 月底。采用平晒生产工艺,分春晒和秋晒两个生产阶段;春晒阶段一般完成全年生产任务的 70%~80%,9 月上旬至 11 月上旬为秋晒,由于蒸发量逐渐减少,因此一般产量不大。

南方海盐区包括浙江、福建、广东、广西、海南和台湾等省(区),日平均气温比北方盐区高,年蒸发量较大(除浙江省外),降水量也大,一般利用连晴日产盐,全年生产。浙江省平均年蒸发量 1 100 mm 以上,降水量 1 000~1 300 mm 以上,每年 7 月至 10 月连晴天较多,为产盐旺季,其他月份为淡季。福建省平均年蒸发量 2 000 mm 以上,平均年降水量 1 000~1 500 mm 以上,气候干燥的 10 月至翌年元月是产盐旺季,每年的 7 至 9 月雨量虽大,但连晴天多,也可产盐。广东省雷州半岛和海南省的盐区年蒸发量为 2 000~2 400 mm,年降雨量为 1 000~1 200 mm,每年的 3 月至 7 月气温高、日蒸发量大、雨量不多,为产盐旺季;湛江以东盐区年蒸发量为 1 500~2 000 mm,年降雨量为 1 800~2 500 mm,每年的一季度和四季度雨量少,连晴天多,为产盐旺季。广西年蒸发量平均 1 800 mm 以上,年降水量平均 1 700 mm 以上,雨水集中在 6 月底到 9 月,每年的第二和第四季度为生产旺季。

(2) 湖盐矿产

我国是世界上湖盐矿产资源极其丰富的少数几个国家之一。既有固相湖盐矿床,也有液相湖盐矿床(亦称卤水湖),并以固液相并存者为多。固相矿床除大量产出石盐外,还常有芒硝、石膏、天然碱、钾石盐、光卤石、菱镁矿、镁盐、硼酸盐等。矿体形态以层状和似层状为

主,呈较大范围的连续沉积,工业价值最大。湖盐矿床均形成于第四纪,没有经历较大的外力地质作用,故一般基本保持着原来的水平沉积产状。石盐矿石 NaCl 含量一般在 70% 以上。盐湖卤水矿床中富含钠、钾、钙、镁、硼、锂、溴、碘、铷、铯、锶等。湖盐矿床固相矿床受地表水、地下水和大气降水的溶浸作用,可变为卤水;盐湖卤水在干旱气候蒸发作用下,可逐渐浓缩结晶形成固相盐层,这种固液相转化的特性,是湖盐矿床的一大特点。我国湖盐矿床地处内陆,分布于干旱—半干旱的荒漠草原地带,受风沙侵蚀和洪水冲蚀作用强烈。湖盐矿床一般出露于地表或埋藏很浅,矿石硬度小,易于开采。单一液相即卤水盐湖矿床一般尚未开发利用,目前仅对个别卤水湖进行间歇性小规模开采。

(3) 岩盐矿产

据统计,现已查明 NaCl 储量大于 100 亿 t 的岩盐矿床就有 10 余个,例如四川省威西盐矿,江西省清江盐矿等。就矿床分布而言,在四川盆地中,岩盐分布面积 1 万至 2.5 万 km² 范围内的有川中凹陷、成都凹陷;面积为 1 000 km² 的有威西凹陷和垫江凹陷等。矿石品位的高低,一般因地区而异。四川省的岩盐矿品位都比较高,例如威西盐矿含 NaCl > 95%,川中盐矿、垫江盐矿及成都—蒲江盐矿含 NaCl 为 85%~95%,自贡地区盐矿含 NaCl 90%;云南省的岩盐矿品位较低,一般为 30%~60%;其余各省(区)的岩盐矿含 NaCl 中等,一般在 70%~80% 左右。岩盐矿石中常见的伴(共)生矿物有钙芒硝、硬石膏、天然碱、钾石盐、杂卤石、光卤石、天青石、无水芒硝、石膏等。地下天然卤水中富含钠、钾、钙、镁、锂、铷、铯,并含少量重金属和放射性元素等。

我国岩盐矿床绝大多数埋藏于地下数十米至 4 000 m 左右,矿体一般呈层状、似层状或透镜状产出,产状平缓,矿石易溶于水,因此在四川、湖北、湖南、江西、云南等省已多采用水溶法开采岩盐矿床。与早采法相比,生产成本大为降低。

(4) 地下卤水矿产

盛产于四川及邻近各省的天然地下卤水,因形成条件不同,使其颜色和成分各异:产于三叠系海相地层带黑色悬浮物的卤水,称为黑卤;产于侏罗系和白垩系地层带黄色悬浮物的卤水,称为黄卤。黄卤又按其含钡与否,分为有钡黄卤和无钡黄卤。自贡地区的各种黑卤,含 NaCl 约 12%~18%,黄卤含 NaCl 8%~12%。

6.1.4 盐类矿床的形成条件、地质特征及分类

组成盐类矿床的盐类物质来源于以下几个方面:

- ①火山喷发或热液把地球内部的盐类物质带到地面。
- ②岩浆岩和变质岩等风化结晶岩石经风化剥蚀,把原生硅酸盐矿物中的钾、钠、钙、镁等元素分解为易溶盐类,随水迁移,进入成盐盆地,并在那里聚集。
- ③大陆上的沉积岩或沉积矿产在机械力、化学力的作用下产生破坏,破坏产物中所含成盐元素,依物理化学方式迁移,在盆地中重新聚集。

形成岩盐矿床需具有一定的大地构造条件:

- ①多形成于大的造山运动之后,例如晋宁运动后沉积了震旦纪的长宁盐矿,海西运动后在四川盆地形成了规模巨大的三叠纪盐矿,燕山运动后沉积了广泛分布于全国的白垩纪—第三纪岩盐矿床。

- ②多形成于地壳相对稳定,并具有一定的活动性的凹陷(或盆地),例如位于巴颜喀拉地

槽区东端的盐源盐矿(属地槽型盐矿);四川地台的震旦纪盐矿,早、中三叠世盐矿(属地台型盐矿)等。

盐类矿床的形成有时具有环状水平分带现象。溶解度小的盐类物质先沉积,分布面积较大,溶解度大的盐类物质依次后沉积,分布面积较小;自盆地边缘向中心依次为:石灰岩、白云岩、白云质灰岩(或杂色碎屑岩系)、硬石膏、石膏(或钙芒硝等)、石盐(有时还有钾镁盐);石盐和钾镁盐沉积在盆地中心。例如四川川中盐矿、山东大汶口盐矿和东营盐矿等。

石盐与其他盐类矿物密切共生,有时富含稀散元素,常具有综合利用价值。

湖盐矿床的形成,具有明显的韵律性:从碎屑岩沉积开始,经黏土-淤泥沉积,终止于蒸发盐类沉积,构成一个完整的沉积旋回。其中单旋回沉积湖盐矿床如内蒙古吉兰泰盐湖,多旋回沉积湖盐矿床如青海察尔汗盐湖和山西运城盐湖等。

我国湖盐矿床多形成于第四纪晚期,并可分为三个成盐期:第一成盐期发生在中更新世至晚更新世,在山西运城湖盆出现钠镁硫酸盐沉积,为我国盐湖最早的成盐期。第二成盐期发生在晚更新世末至全新世初期,形成许多大型成盐盆地,如柴达木盆地、羌塘盆地、查干诺尔盆地、吐鲁番盆地等。第三成盐期发生在全新世,为我国盐湖成盐作用最强烈、最普遍的时期,成盐作用至今仍在进行,如吉兰泰盐湖、马尔盖茶卡盐湖。

干旱-半干旱的气候条件是形成湖盐矿床的一个重要因素。我国湖盐矿床广泛分布于内蒙古、新疆、青海、西藏等省(区),这一带年降水量不足400mm,年蒸发量却高达2500~3000mm,冬季严寒,夏季干热,风沙多,日照时间长,为典型的大陆性干旱气候区。

根据矿床形成的地质时代,盐类矿床分为古代盐类矿床和现代盐类矿床两大类。根据矿床成因特点及赋存状态,石盐矿床可分为岩盐矿床、地下卤水矿床和现代盐湖矿床三类。

(1) 岩盐矿床

岩盐矿床类型属古代盐类矿床,为第四纪以前形成的固体矿床。根据岩盐矿床形成时的沉积环境和物质来源等因素,通常分为海相沉积岩盐矿床(简称海相盐矿)和陆相沉积岩盐矿床(简称陆相盐矿)两个成因类型。

①海相沉积岩盐矿床。此类矿床的盐类物质主要来源于海水,在封闭或半封闭的海湾及泻湖盆地中经过长时期的蒸发沉积而成。其含盐岩系除滨海泻湖相沉积为砂泥岩建造外,主要为碳酸盐建造。海相盐矿具有规模大、埋藏一般较深、NaCl含量高、组分单一、单矿层厚度大、成矿面积大、储量丰富等特点。含矿面积可达数十万平方公里,盐层厚度可达数千米,储量规模可达数千亿t。代表性矿床如四川境内的震旦纪和三叠纪盐矿、山西临汾和陕西延长的中奥陶世盐矿,及新疆塔里木盆地的白垩纪—第三纪的盐矿等。我国海相盐矿的储量约占全国盐矿总储量的85%以上。

②陆相沉积岩盐矿床(亦称内陆湖相沉积岩盐矿床)。此类矿床为盐类物质被地表水或地下水携带,并聚集于内陆盆地后,经过长时期的蒸发沉积而成;其含盐岩系均为砂泥岩建造。陆相盐矿埋藏较浅,矿床规模和分布面积一般要比海相盐矿小,NaCl品位比海相盐矿低一些,具有矿层数多、单层厚度小、共生组分多、相变大等特点。我国陆相盐矿主要形成于侏罗纪以后,集中分布在云南、湖北、湖南、河南、江西等省,代表性矿床如湖北云应盐矿等。

(2) 地下卤水矿床

古代与现代均可形成地下卤水矿床。

地下卤水矿床成因类型分为三个亚类型:

①沉积型卤水矿床。

沉积岩在成岩过程中封存于砂粒之间的或在成岩后进入孔隙和裂隙中的古海水,经过浓缩和变质作用,成为矿化度较高的地下卤水(亦称原生封存卤水)。

②淋滤型卤水矿床。

地下水在运动过程中溶解岩层中的盐类物质或岩盐矿床,尔后聚集形成的地下卤水。

③沉积-淋滤混合型卤水矿床。

由沉积型卤水和淋滤型卤水在地下运移过程中混合而成的地下卤水。

地下卤水矿床工业类型可分为古代地下卤水和现代地下卤水矿床两种。

现代地下卤水指赋存于潮滩沉积物(粉砂层)中及河口滨海相沉积物(粉细砂、中粗砂和砂砾层)中的第四纪滨海地下卤水,埋藏较浅。含卤层呈似层状、透镜状,层位较稳定至不稳定。矿化度较高,水化学成分以NaCl为主,富含 Mg^{2+} , SO_4^{2-} , 含 K^+ , Br^- 较高,例如山东莱州湾滨海地下卤水。

而古代地下卤水原则上又可分为孔隙型、裂隙型和孔隙裂隙综合型三种,即:

①孔隙型地下卤水矿床。

古代地下卤水指赋存于岩盐矿体或含盐组上覆地层(砂岩或砂砾岩)孔隙中的地下卤水。此类卤水以承压水或自流水为主,动态稳定,埋藏较深;含卤层呈层状或似层状,层位稳定至较稳定,富水性弱至中等;矿化度中等,水化学成分以NaCl为主。例如湖北潜江地下卤水矿床等。

②裂隙型地下卤水矿床。

指赋存于含盐岩系或岩盐矿体围岩裂隙中的地下卤水。埋藏较深,含卤层呈层状或似层状,具有层间封存和沿构造破碎带富集、延展的特点。以承压水或自流水为主,动态较稳定。矿化度较高,水化学成分以NaCl为主。例如四川资中县双河场和自贡邓关构造等黑卤型卤水矿床。

③孔隙裂隙综合型地下卤水矿床。

指赋存于含盐岩系弱风化淋滤带的溶蚀孔隙和裂隙中的地下卤水。此类卤水埋藏较浅,含卤层呈似层状或透镜状。以潜水为主,富水性弱至中等。矿化度一般较低,水化学成分与下部固体盐矿基本一致。例如四川丹棱县柏木桥硝卤矿床。

(3)现代盐湖矿床

现代盐湖矿床的成矿时代均为第四纪。按矿床的赋存状态,可分为固相湖盐矿床、液相湖盐矿床和固液相并存的湖盐矿床,即:

①固相湖盐矿床。

指完全干涸没有卤水的干盐湖和以固体钠盐沉积为主要开采对象的湖盐矿床。前者如青海察尔汗斯拉图湖,后者如内蒙古吉兰泰盐湖等。

②液相湖盐矿床(亦称卤水盐湖矿床)。

指没有钠盐沉积或只有不能单独开采的少量钠盐沉积的卤水湖。例如新疆艾比湖,青海柴达木盆地昆特依盐湖等。

③固液相并存的混合相湖盐矿床。

此类矿床的开采特点是固、液兼采。例如内蒙古额仁淖尔盐湖、新疆七角井盐湖等。

6.2 盐类矿床开采方法

6.2.1 概述

盐类矿床的开采工艺方法多种多样,应根据其矿床类型、地质赋存条件、矿盐物理化学性质等进行合理选择确定。它既可以是传统的地下、露天或二者联合的开采方法,也可能是根据盐类矿床自身的特点专门设计的钻孔水溶开采法或水力压裂开采法,还可能是专门为湖盐矿床或海盐矿床设计的特殊开采工艺和方法。具体地说,现代盐湖矿床主要为露天开采(图6-4),次之为地下开采(图6-5)以及组合式开采。现代盐湖的卤水是采用“垦畦浇晒”法;对裸露地表或近地表的固体矿采用露天开采;对深埋地下百余米的掩埋型芒硝矿床采用地下开采或组合式开采。现代盐湖矿床也可分为人工开采和机械开采;古代盐湖芒硝类固体矿床有旱采和水采两类,旱采可分为地下开采和露天开采两种;水采有钻井水溶法开采和硃室水溶法开采。地下卤水的开采有自喷法和机械法。



图6-4 湖盐露天开采场



图6-5 岩盐地下开采

6.2.2 盐湖矿床开采方法

6.2.2.1 湖盐矿床的开采技术综述

从盐湖中直接采出的盐和以盐湖卤水为原料在盐田中晒制而成的盐,其生产历史悠久。生产方法因资源情况而异:凡已形成石盐矿床并赋存丰富晶间卤水的盐湖,如中国和俄罗斯的多数盐湖,主要是直接开采石盐;未形成石盐矿床或石盐沉积很少的盐湖,如美国犹他州的大盐湖、印度的桑巴尔盐湖、中国山西省的运城盐池等,需在湖边修筑盐田,引入湖中卤水,日晒成盐;无晶间卤水的干涸盐湖,如澳大利亚的马克利奥特湖,需注水溶制饱和卤水晒盐或直接开采原盐。其原理及操作与海盐基本相同,但盐湖卤水浓度较高,所需蒸发池面积相应地比海盐少。

湖盐开采是以手工或机械方法从盐湖中直接采出石盐的过程。石盐为天然结晶,呈透明、半透明状,氯化钠含量高,结构松散或半松散,矿体呈层状、似层状或透镜体,直露地表,易开采,生产成本和能源消耗低于海盐和井矿盐。中国湖盐开采长期以来都是手工操作,用铁钎捣破覆盖在盐湖表面厚20~30 cm、混有泥沙的盐盖,堆集在采坑一侧;再逐层松

动盐层,用铁耙将盐粒在卤水中反复洗涤,用带孔铁勺捞出,堆集在采坑的另一侧,每人每天可捞盐3~5 t,劳动强度极大。20世纪70年代后期起,逐步实现机械化作业,如内蒙古吉兰泰盐场用联合采盐机采盐,自卸汽车运盐,水力管道输送和堆坨机堆坨;青海茶卡盐场则用联合采盐船采盐,装小火车运输。

联合采盐机将采盐、脱卤、装车设备组装在一个车厢内(图6-6)。

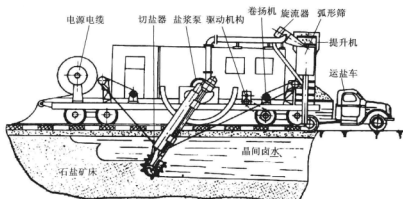


图6-6 联合采盐机的基本构成

联合采盐机沿轨道往返运行作业。生产能力100 t/h。开采盐槽的最大深度5 m,长度一般为1 000 m。采完一条盐槽后,用拖拉机牵引轨道,横向搬运1.1~1.2 m,继续开采下一盐槽。采盐时,直径1 m、外周装有切割刃具的切盐器,以每分钟33转的速度切割盐层,使盐粒悬浮于卤水中,形成一定浓度的盐浆。切盐器的切割方向和切割深度,由卷扬设备绳索的收、放来控制。为防止盐层坍塌,采盐槽的垂直面向湖内坡倾向15°角。吸盐泵将盐浆吸送至水力旋流器,使泥沙及细粒石膏由顶流排向已采空的盐槽内沉降,盐粒由底流排向弧形筛脱卤。筛上装有喷头,用清卤强力冲洗盐粒,除去杂质后流入提升机,在提升过程中再一次沥出卤水,装入自卸汽车,运至水力输盐泵站。采盐机借助驱动装置带动车轮,以2 m/min的速度在轨道上运行。整机动力为100 kW,经电缆卷筒由湖内电源引入车内。由于采盐机在轨道上运行作业,开采的盐槽排列匀整,操作控制也比较简单,但对移轨后的直顺和平行程度要求严格,否则影响盐的采出率。

联合采盐船装有松动盐层的切盐器、吸盐泵与采盐机具的船。切盐深度依靠门架和卷扬设备控制,切割进尺由船上的横移绞车和定位桩控制,采盐时船体作扇形摆动。吸盐泵吸入的盐浆经船尾的水上浮管送至湖边坨地或湖内移动式脱水站,脱卤后装小火车外运。采盐船动力由铺设在浮管上的电缆从岸上供电。可在水中连续作业,采深3 m,吃水0.6 m,生产能力60~100 t/h。联合采盐船的特点是:①采出的盐经浮管连续送至脱水站,可提高采盐效率和设备利用率;②盐层中的泥沙可随盐浆排至湖外,为湖内卤水继续结晶创造良好条件;③采盐船对盐层连续切割,中间不留“盐墙”,可通过运行参数的控制,提高矿床采出率。但开采前必须作好采区规划,湖面上树立观测标志,以控制船体的前进和摆动幅度,防止漏采和采深不一。还有一种链斗式采盐船,用链斗采盐装置将石盐采出,直接装船,运往洗涤、

脱水工段,适用于湖面承载能力差、充水条件好的湖区。

盐湖中原来沉积的石盐经采出后,其空间即为晶间卤水所填充,经日晒蒸发,又结晶成盐,每年生成新盐的厚度为20~30 cm,盐层更为松散,盐粒细小,氯化钠含量可达95%以上,采出后通过简单的洗涤、脱水、干燥,即符合食盐标准。这种盐通称再生盐。许多盐场既开采原盐,也有计划地开采再生盐,开采方法同上。

湖盐加工指对从盐湖中采出的原盐,用不同方法除去所含杂质的过程。盐湖石盐中除主要成分氯化钠外,还含有泥沙、石膏、芒硝等杂质。泥沙可在开采过程中,通过联合收盐机(船)上的洗涤、喷淋工序除去。石膏含量往往随盐层深度而增多,因此开采上部盐层时,针对石膏少、颗粒细的特点,利用水力旋流器的分级和振动筛的筛选作用,使盐与石膏分离。开采中部以下盐层时,则对采出的原盐进行焙烧,使二水石膏脱水成为半水石膏,通过碾钙机的搓碾,使成为细粉状,经分级机溢流除去。含芒硝的原盐,盐硝不易分离,可利用芒硝析出规律,夏季采盐,冬季捞硝。

值得指出的是,在开采湖盐的同时,必须注重资源保护。盐湖周围多为沙漠、戈壁,长期受自然和人为因素影响,湖周自然生态失去平衡,沙化加剧,流沙不断侵入湖内。因此,在开发盐湖的同时,需在湖的周围造林、育草,扩大植被,以防止沙害。盐湖一般都处于干旱地区,开采时揭开盐盖后,晶间卤水裸露,蒸发加快,如果没有足够的水源补给,将导致湖中水位下降,影响长远开发。深入研究补水技术,考虑合理的开采规模,是湖盐开发的一项重要课题。

6.2.2.2 盐湖矿床开采方法

(1) 现代盐湖固相芒硝矿床

现代盐湖固相芒硝矿床盐湖固相矿床的矿石品位有高低,盐类矿物具有可溶性。富矿可用露天直接开采,贫矿可经固-液转化,以液相形式采出。

根据采出矿石的方式和原理,开采方法可分为直接采出固相矿的开采法和化学开采法。前者为露天开采,用人工或常规开采机械直接开采矿石。此法适用于赋存条件简单、矿石品位高,采出的矿石能满足加工技术要求的矿床。化学开采是将固相矿石经固相-液相转化,以液相形式采出。它是基于其物理-化学原理,用水或其他溶剂作为溶矿介质。适用于赋存条件复杂、直接采出困难的固相矿石,或矿石品位低、矿层薄、直接采出的矿石达不到加工技术要求的矿床。

直接采出固相矿石的开采方法,按对矿床充水的处理方式,又可分为预先疏干开采和预先疏干开采。根据采运机械设备类型,开采方法可分为旱采旱运、旱采水运、水采旱运、水采水运4种类型。

化学开采法是在矿床的赋存地用化学的方法(地下浸取和沉积芒硝法)将有益矿物组分取出来的方法。随着工业对矿产资源需求量的不断增加,富矿和容易开采的矿石产量将满足不了要求,而化学采矿法,开辟了对贫矿、分散小矿以及老矿残留矿柱的开采途径,也使深部矿床与过去因技术原因不能采掘的矿床得以开发。

随着国民经济的不断发展,交通日渐发达,盐湖矿床逐步得到了开发利用。但大量采掘的是原生石盐和晶间卤水中新结晶的石盐(俗称“再生盐”)。这导致晶间卤水大面积暴露,蒸发量加大,卤水水位迅速下降;晶间卤水也逐渐“老化”(镁盐、硫酸盐含量显著提高),既影响原生石盐的采掘、洗涤,又影响“再生盐”的质量和产量。因此,自20世纪70年代以来,

内蒙古吉兰泰、雅布赖和额吉淖尔盐湖,新疆的七角井盐湖等先后采用了水溶开采。将盐湖边部或盐湖底部的承压淡水引入盐湖,溶解边矿、薄矿,改善卤水质量,进而提高了“再生盐”的质量和产量,促进了湖盐生产的发展。

(2) 现代盐湖卤水矿床

盐湖卤水的开采方法将卤水泵入盐田,利用阳光蒸发对卤水进行滩晒,经浓缩结晶产品,一般是夏季采盐、冬季采硝。也可以直接从卤水提取产品。

开采实例有山西运城盐湖。该矿床为现代沉积、固液共存以芒硝为主的盐类矿床,既有湖水矿床,也有浅部芒硝矿床,还有深埋地下 100 多 m 的掩埋型芒硝矿床。该矿的盐湖卤水是采用“垦畦浇晒”法开采,在湖漫滩地区则采用露天开采;对于矿区界村矿段等深埋地下 100 多 m 的掩埋型矿体采用钻孔水溶法开采,或旱采和水采结合使用。

(3) 古代盐湖芒硝矿床

旱采:按开拓方式可分为露采、露天-地下、地下开采。露天开采只宜于矿床埋藏浅的情况。在古盐矿床开采中大多采用地下开采。目前广泛采用的是竖井开采(少数为斜井)的房柱法。竖井对各种地质条件的盐类矿床适应性较强,对开采规模大、品位高、矿体埋藏在 1 000 m 内和生产能力较大的矿床较为适用。

水采(化学采矿):分为硐室水溶法和钻井水溶法。除特殊情况外,硐室水溶法一般在矿石品位低、杂质多的古盐矿床中采用。国外其他矿山则普遍采用钻井水溶法。

钻井水溶法分为单井作业和多井作业。这种方法是从地面向地下钻井,然后在钻井中设置管道与地下矿体相通。将淡水或淡卤水通过注水管注入地下,溶蚀矿体,造成人工空穴,以便建立一个足够容纳溶出矿液的区域,然后将矿液经管道抽出。残余母液经加水调节后,重新注入地下溶蚀矿体。

(4) 地下卤水的开采

地下卤水的开采,是用钻机打卤水井,揭开赋存卤水的构造和含卤水层,下套管后进行采卤。在地压作用下,有些卤水可自动从井内喷出地面,则可以自喷取卤。如果地压小于卤水井底部液柱压力,卤水不能自喷,须在井内保持一个液面,可用采卤机械将卤水抽出地面。开采地下卤水常用的方法有气举法、抽油机-深井泵采卤法、电动潜卤泵采卤法及提捞采卤法等。

6.2.3 盐类矿床的水采技术

6.2.3.1 水采技术分类

盐类矿床的水采技术简单地讲,就是利用某些盐和碱类矿床易溶于水的特点,通过钻井或井巷注入淡水,溶解地下矿床中的有益组分,成为溶液返出地面,进行加工的采矿方法。本法广泛用于开采地下岩盐矿床,并逐步应用于钾盐、天然碱等矿床。与普通凿井法比较,本法的优点是:可开采埋藏较深(目前已达 3 000 m 左右)或品位较低的矿床;投资少,见效快;设备和工艺简单;生产费用和能耗低;劳动条件好,环境污染不严重等。缺点是:回采率低于 40%;不易控制溶蚀范围;对埋藏浅的矿床,往往引起地表塌陷。

目前岩盐水溶开采的矿山常用的水采技术主要有钻井水溶法和硐室水溶法。

(1) 钻井水溶法

起源于古代的凿井汲卤技术。中国开发地下天然卤水,已有 2 000 多年的历史。当时的盐井是大口浅井,用辘轳、吊桶汲卤煎盐。11 世纪(北宋皇祐年间)出现井径约 20 cm,深达

数十丈的卓筒井(见中国古代深井开凿技术),用提捞法采汲深部卤水。20 世纪初,四川省自贡县向岩盐钻井注水后采汲卤水,是中国钻井水溶法的先声。60 年代起,中国云南及新建的四川、湖南、湖北、江西等省盐矿,先后采用本法成功。19 世纪 80 年代,美国纽约州汲卤制碱,发现岩盐,开始采用本法。20 世纪 30 年代起,推广到世界岩盐主要生产国家。50 年代起加拿大开始用溶解法试采钾盐,1964 年开始工业生产。近年中、美等国都用本法试采天然碱矿。本法的钻井、固井及完井方式,与石油和天然气钻井基本相似,但生产方式和井身结构不同。常用的有单井生产和井组生产两种方式。

(2) 单井生产

20 世纪 60 年代以来,回转式钻机迅速发展,钻井技术逐步提高,可以满足单井对流法的开采工艺要求,盐井具有多层同心管的井身结构——表层套管和技术套管固井,使注、采系统处于相对密封状态(图 6-7)。单井对流法又分简易对流法、气垫对流法和油垫对流法。注、采系统在同一口井,简易对流井再增设一层中心管,油垫(气垫)对流井除中心管外,还需下内套管。

① 自然对流法。井身结构包括由井口至盐层顶部的技术套管以及套管内下至盐矿底部的中心管。生产用正循环(淡水从套管环隙注入,卤水由中心管返出),或正、反循环交替进行。此法因回采率低(10%~20%),生产能力小,应用受到限制。

1960 年秋,自贡大安盐厂大三井完钻,井身质量不符合提捞采卤要求,参照前苏联盐矿的水采资料,用简易对流法水溶开采试验获得了成功。1967 年,在自贡大山铺薄层盐矿(厚 1~6 m)应用此法开采,替代了原有的提捞采卤法。生产实践证明,此法虽然存在井下事故多,矿石采收率低等严重缺点。但因其开采工艺简单、适用性强、基建投资少、生产成本低等优点,自 70 年代以来,已先后在川、滇、湘、鄂、赣、皖、苏、粤、鲁、豫等省盐矿普遍推广应用。

② 油、气垫法。20 世纪 30 年代末,美国人特朗普(N. E. Trump)提出,在溶腔中注入不溶于岩盐的惰性流体(石油或气体),浮于水体表面保护盐顶,以控制上溶,迫使侧溶,称油、气垫法。60 年代起,获得广泛应用。此法在技术套管和中心管间,加有一根悬空的内套管,其环隙供注、排油用。作业分两阶段进行:(a)建槽阶段。在盐层底部建造高度为 2~5 m、直径 80~100 m 的扁平盐槽。操作以正循环为主。油垫厚 2~3 cm,一般用优质原油或柴油。(b)生产阶段。盐槽建成后,排出部分或全部油料,逐步或定期提升注水取卤管串,开始分段向上溶采盐层。此法最适于开采顶板岩层破碎的厚盐矿体或建造地下岩盐储存溶腔。优点是:可以控制溶蚀范围和防止地表塌陷;生产能力大(可达 250~300 m³/h),卤水浓度高(300 g/L 以上);井下事故少,钻井服务年限长,回采率高(30%以上);采完后的溶腔利用价值高。缺点是:建槽期和需要处理大量淡卤;井身结构和井口装置较复杂,投资费用较大;

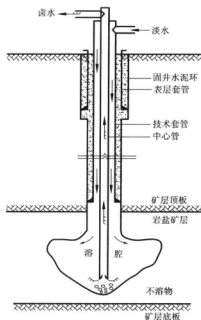


图 6-7 单井对流法示意图

增加油料费用。

1962年,云南轻工厅制盐处、云南轻工研究所和轻工部制盐室在磨黑盐矿进行了室内模拟试验。嗣后,与乔后盐矿、磨黑盐矿合作,先后于1965年和1966年在坑道内进行了气垫对流法水溶采盐中间试验和试生产,均获得了成功。

气垫对流法的主要缺点是气体不易控制、管道和设备腐蚀严重,开采深度受空压机能力限制。其优点是可以控制上溶,加快侧溶;自下而上地溶采,矿石采收率较高;可利用压缩空气排出溶洞内残渣,利于继续溶采;比硐室水溶法基建投资少,生产成本低。因此,迅即在云南埋藏深度较浅的低品位(NaCl 40%~50%)盐矿中推广应用。

油垫对流法可以有效地控制上溶;在达到一定溶采半径,完成建槽后,自下而上地溶采,矿石采收率较高;水采溶洞形状可控;在盐丘中建造溶洞,其顶板稳定,密封性好,可储存石油、液化石油气,可永久性地储存化学工业的有害有毒物质和核工业的放射性废料等。因此,这项先进的水采方法于1947—1949年在前苏联斯拉维扬盐矿问世以后,很快被世界各国广泛采用,且至今仍不失其先进性。

1962年,我国在云南磨黑盐矿进行了室内模拟试验后,于1963年5月至11月,又在该盐矿坑道内进行了油垫对流法水溶采盐试验。1963年底掘进巷道,剖井观测结果:溶洞直径2.2 m,净高2.3 m,溶洞形状为顶部平整的倒锥体。证明中等品位(NaCl 50%)以上的盐矿可以用油垫对流法水溶开采。1975年11月~1976年4月,在自贡长山盐矿120井进行油垫对流法水溶采盐试验;1978年在五通桥盐厂罗城矿区的24井进行了“两管油垫”对流法水溶采盐试验,均获得了成功。此后,这项先进的水采技术在川、滇、苏、粤、鄂等省一些品位较高、厚度较大的石盐、无水芒硝矿床中推广应用。

总之,单井对流法是我矿使用最普遍的一种方法,施工技术要求较低,建槽期长,4~5个月,建槽成本较高,仅单井建槽的运行费用大约在6万元以上。

采卤过程中要求操作平稳,尽可能保持一定的槽压。

保持槽压的计算方法:

槽压 = 注水压力 - 出卤压力 - 液柱重度损失 - 沿程阻力损失

液柱重度损失 = (卤水重度 - 注入水重度) \times 井深

单井一般不允许人为泄压,在长时间停产时应当注水保压。修井前的泄压,应当保证平稳泄压,停止注水后,泄压的出卤流量一般不得大于原来生产时的出卤流量。急躁泄压将造成溶腔顶板垮塌,这是因为支撑顶板的压强卸载过快引起的。

如果开采区域内的盐层有 9° ~ 15° 左右的倾角,溶腔的中心在采矿过程中,从井底开始不断地向上倾方向偏移。当溶腔的跨度达到一定程度时,顶板将开始垮塌。由于井筒不在溶腔中心,油套管受剪切和拉伸破坏。

单井溶腔发展到一定规模后,溶腔中的卤水受重力分离作用的影响,即使是停产状态,对矿层的溶解还将持续进行。

因此,对简易对流的生产井,最好是持续稳定高效地开采。所谓持续,因为卤井的寿命是有一定的限度的,在它的寿命期限内,快速地采出矿石有利于提高采出率。所谓稳定就是应该压力、流量稳定,配采过程中的调整,应该采取多井、小幅度的调整。所谓高效就是在保证卤水质量的情况下,尽可能提高采矿强度。

(3) 井组生产

相邻的双井或多井溶腔连通,又称通腔生产。它可分为:

①自然通腔。相邻钻井的溶腔在后期自然连通生产。

②油垫建槽通腔。利用油垫建槽时的双井通腔生产。

③水力压裂通腔。20世纪50年代初,美、法等国引用油田压裂技术,完成钻井通腔生产,因费用低、见效快,迅速获得推广。中国湘、鄂、赣等省的多层岩盐矿床,20世纪70年代起,采用水力压裂通腔,成功率较高。本法由一个加压(注水)井和一个目标井(出卤井)组成,井距100~150 m。井身结构按完井方式而定。

压裂通腔包括三个阶段:①压裂阶段。注水压力达最大值,压裂盐层,形成沟通目标井的人工裂缝。②扩展阶段。逐渐加大注水量,将压裂的裂缝冲刷和扩大成通道。③生产阶段。双井间形成通道,保持稳定的生产低压,转入通腔生产。

影响水力压裂成败的因素有:矿床的地质埋藏条件、布井方式、井距和行距;选取的压裂部位和压裂程序、完井方式、矿区压裂的方向性、矿层中目标井周围的局部应力等。井组通腔生产的优点是:生产能力较大,井下事故较少,有可能提高回采率。缺点是:容易形成无法控制的大面积溶蚀而引起地表塌陷,成功率不高。

其实,溶蚀连通采卤是简易对流采卤的后期,两井或者多井间溶腔连通后的采卤方式。

基本控制方法与简易对流法相近,不同的是对溶腔形态的控制。一般注水井附近溶腔发展快,出卤井附近发展慢,甚至发展趋于停止。

合理的溶腔形态应该是哑铃形或者跑道形的,这就要求适时调换注水出卤方向。采区的卤井基本是沿倾向布置的,一般处于下方的卤井出卤质量较高,这样可能造成上方卤井的过量开采,而下方卤井开采不充分,导致整个开采块段的采出率不高。

溶蚀连通井可以作为生产过程中流量调节的主要井。但是调节幅度不宜过大,以免产生大面积顶板垮塌。

水平对接井连通是一项采盐新技术,应用效果还在摸索阶段。

该方法后期的管理应该与溶蚀连通法是一致的,不同的是早期的控制方式。

水平对接井钻凿完成后,应该尽快投入注水运行,在盐层中建造的近于水平的通道极易闭合或者堵塞。岩盐有蠕变特性,在地下高温高压作用下,产生流动,最终可使通道缩径以至闭合,钻孔的裸眼段较长,可能坍塌掉块,堵塞通道。尽快投入运行可以避免这种情况的发生。

早期的对流实质也是一种建槽,其实质就是扩大溶蚀面积。但是不同于简易对流的建槽,可以用减小流量的方法来提高卤水质量。

此外,潜卤泵采卤应该是采卤的一种补充方式,而且在实际应用中占有相当大的比例。一般用于采盐的末期,溶腔失去密闭条件的区域。

潜卤泵采卤的主要目的是:①充分利用溶腔中的滞留卤水和开采不密闭溶腔边缘的岩盐。②降低地下卤水的水位,治理地面冒卤。

岩盐水溶开采后的溶腔不是人们想象的一个大空腔,在盐层薄、夹层厚的情况下,溶腔跨度大,顶板垮塌严重,不溶物受水浸泡后体积膨胀,溶腔实际上会被不溶物部分充填。溶腔中卤水的运动实际上是一种渗流,而不是简单的管道流。

潜卤泵抽水前,地下的卤水处于静止平衡状态,水头线是水平的。潜卤泵抽水运行时,抽水井附近的水位会下降,产生一个降落漏斗。其降落曲线是一条对数曲线,曲线的参数与泵口淹没深度、抽水流量、地层的渗透性有关。

抽水井的水位不能直接测量。

水位观测井必须有与抽水井距离不相等的2个或者2个以上,才便于水头线分析。水头线的剖面图横坐标是以抽水井至观测井的距离来确定的。

对一个区域的潜卤井进行观测和分析,可以判断该区域内溶腔的渗透特性,可以根据所需的影响半径确定挂泵深度,并根据水头曲线确定观测井的控制水位。

(2) 硐室(坑道)水溶法

开拓方式与房柱法相同。硐室(矿房)之间保留永久连续矿柱,淡水注入硐室的切割巷道静溶,通过井下管道水泵系统抽出浓卤。此法适用于开采含盐品位较低的岩盐矿体,劳动生产率比普通开采法高,可将不溶物遗留井下,但投资大,见效慢,开采深度有限。

我国硐室水溶法开采于1964年,开始在云南一平浪盐矿的废旧坑道内进行试验,于1965年2月获得成功。该盐矿品位很低,NaCl仅29.4%, Na_2SO_4 6.9%,泥沙等不溶物高达60%,试验证明不宜用钻井水溶法开采。硐室水溶法试验成功后,随即替代了原来的房柱法开采,减少了人力、物力消耗,降低了生产成本,减轻了地面环境污染。生产实践证明,硐室水溶法是一项针对特低品位盐矿(NaCl 30%~40%)或溶解速度较慢的盐类矿物(如钙芒硝等)的先进而实用的水采技术。

6.2.3.2 水采技术的发展

随着钻井技术的提高,井底动力钻具开始应用于盐矿钻井,钻井深度逐步增大,钻井和固井质量逐步提高。食用盐品种和质量要求不断提高,工业用盐日益增长,从而促进了我国水采技术全面而迅速地发展。

对于盐层层数较多、单层厚度较薄的矿床,采用单井对流法水溶开采,其建槽时间较长,卤水产量较低。因此,对多层、薄层盐矿的开采,国内外专家、学者普遍认为,用井组连通法水溶开采较好,这已被生产实践所证明。根据连通工艺的不同,可分为压裂连通法、单井对流溶蚀连通法和定向井连通法。

(1) 压裂连通法

压裂连通法具有基建投资省,投产时间快,卤水产量大、浓度高、成本低,井下事故少等优点。理论和实践证明,在盐层中进行定向喷射建槽,或单井对流传建槽后,再进行水力压裂,可降低破裂压力,提高连通概率。此法虽存在“压裂连通的方向和部位不能有效控制”的缺点,但仍是在两井间盐层中实施连通“最快和最成功的方法”。故压裂连通法是地质构造条件适宜的多层、薄层盐类矿床的主要开采方法之一。

此外,在同一井组的上、下盐群分层进行压裂连通法水溶采盐试验以及在同一井组,同时开采两个工业矿群试验均已取得了成功,把压裂连通法水采技术向前推进了一步。

(2) 单井对流传溶蚀连通法

单井对流传溶蚀连通法,包括自然溶蚀连通法、气垫建槽连通法和油垫建槽连通法。

自然溶蚀连通法是我国最早应用的井组连通法,只是限于当时的钻井水平,盐井不密封,只能用注水溶盐-提携采卤法。现在用简易对流法开采的盐井,生产后期与邻井溶蚀连通后,改用井组连通法开采。湘澧盐矿二采区就是按这种方法设计和生产的,其矿石采收率高于简易对流法。

气垫建槽连通法于20世纪60年代末,在云南乔后盐矿率先应用。该矿坑道内的3井、4井用气垫对流法先后建槽,并分梯段上溶生产一段时间后溶蚀连通,遂改用井组连通法生产;有效地提高了矿石采收率,使气垫对流法水采技术又提高了一步。

油垫建槽连通法的应用以苏联为较早。20 世纪 60 年代初, 亚尔—宾什卡达克和新卡尔法根盐矿已成功地应用油垫建槽连通法开采。

我国于 1978 年 12 月 ~ 1980 年 4 月, 首次自贡贡长山盐矿 128 ~ 129 井组(井底距 75 m), 进行油垫建槽连通法水溶采盐试验获得成功。接着, 自贡盐业地质钻井大队在长山盐矿同一井场, 分别用涡轮钻具和利用自然井斜规律钻成两口定向斜井(213 ~ 214 井组), 其井底距离 68.5 m, 进行油垫建槽连通法水溶采盐试验亦获得了成功。1983 年, 在加拿大多伦多召开的第四届国际盐业学术讨论会上, 各国盐业专家给予充分肯定和赞扬。油垫建槽连通法虽然存在连通时间较长、耗油等缺点, 但是其连通方向和部位可控, 在盐层下部连通后, 自下而上地溶采, 卤水产量大、浓度高, 矿石采收率高, 这项新技术已达到世界先进水平。目前四川、广东等省一些品位较高、厚度较大的盐矿已应用这项先进的水采技术。

(3) 定向井连通法

20 世纪 60 年代初, 前苏联新卡尔法根盐矿钻定向斜井, 使之在盐层底部与油垫对流法水溶采洞连通, 然后用井组连通法开采。该矿生产实践表明, 在溶解 1 km^2 裸露的矿体面积时, 虽然不可避免地要发生地面变形, 但可获得较高的产卤量($400 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上)及较高的矿石采收率(40% 以上)。加拿大杜莎尔尼亚盐区第一卤水田 4 ~ 5 井组, 由 5 井向 4 井(直井)进行中小曲率半径($i=0.46^\circ/\text{m} \sim 0.57^\circ/\text{m}$)定向钻井, 完井后测得井底水平距离 2.13 m, 经单井简易对流法生产数月后实现了连通。

我国地矿部勘探技术所、湖南地矿局 417 队与湖南湘衡盐矿合作, 于 1991 年 11 月 ~ 1992 年 12 月, 在湖南湘衡盐矿 2038 ~ 2039 井组钻两口中小曲率半径“L”形定向水平井, 水平井段长度 11.5 m, 两井连通轨迹呈“U”形。由于中靶误差小($X=0.09 \text{ m}$, $Y=0.40 \text{ m}$, $Z=0.18 \text{ m}$), 用简易对流法建槽 27 h 实现了连通。此后, 这项新技术在湖南、江苏、湖北等省部分盐矿应用, 使我国的定向井连通法水溶开采技术步入世界先进行列。

6.2.3.3 水采技术在各种盐类矿床中的应用

由于水采在生产中显示了巨大的优越性, 我国古代盐矿开采已由水采取代了常规的地下开采。盐湖石盐矿床部分采用水采。自 20 世纪 80 年代以来, 水采卤水折盐量约占全国总产盐量的 20% 左右。随着直接用液体盐(卤水)制两碱(纯碱、烧碱)的用量不断增大, 水采卤水折盐量占全国总产盐量的比例将会进一步提高。

芒硝、无水芒硝矿床开始应用水采。湖南澧县无水芒硝矿进行了油垫对流法水溶开采试验获得成功; 江苏洪泽无水芒硝矿用热水作溶剂, 采用“两管油垫”对流法水溶开采试验成功, 并取得了显著的经济效益。内蒙古达拉特旗芒硝矿用热水作溶剂, 进行简易对流法水溶开采, 取得了初步成效。

河南桐柏天然碱矿用压裂连通法和简易对流法, 加少量烧碱的淡水作溶剂, 这在国内尚属首例。而该矿在同一井组用压裂连通法, 同时开采两层天然碱矿, 这在国外亦属首例。

察尔汗钾矿床固液相并存, 光卤石矿储量大, 但呈薄层分布于石盐矿层中, KCl 品位低而分散。晶间卤水主要成分为 NaCl , MgCl_2 , KCl 含量低, 仅局部达到工业指标, 但晶间卤水中 KCl 储量两倍于光卤石中 KCl 储量。光卤石矿用钻井水溶法开采(淡水取自湖下承压水); 同时开采晶间卤水, 以提高生产卤水的 KCl 含量; 最后用沟渠集卤。实践证明, 察尔汗钾矿采用的井—渠式水溶开采法是一项具有独创性的实用水采技术。

较难溶的钙芒硝矿亦开始试验应用水溶开采。四川新津钙芒硝矿, 将用于特低品位盐矿

开采的硐室水溶法进行改进,经反复试验后获得了成功,现在已用于生产,取得了良好的经济效益。钙芒硝矿应用水采获得成功,标志着水采技术已达到较高水平。

另外,水采技术还正逐步用于深部盐类矿床开发,它使可采的盐类矿产储量大大增加,而且获得了巨大的经济效益。20世纪70年代以来,我国的四川蓬莱盐厂、南充盐厂和索特集团公司万县高峰盐矿,用简易对流法开采深度已达3 000 m左右。江苏洪泽无水芒硝矿用“两管油垫”对流法开采深度达2 200 m左右;湖北沙市盐矿用“两管油垫”对流法开采深度达2 800 m左右。

目前,国内外水采矿山的矿石采收率普遍较低。当盐井水采溶洞顶板垮塌而与顶板破碎带或含水层串通,甚至波及地面时,注采系统处于非密闭状态。在水采矿山开采后期,或者已停采的水采矿山,无法继续用单井对流法或井组连通法开采时,改用潜卤泵(如国产BQL—200型潜卤泵和美国毕节公司D225B—1000型潜卤泵)抽汲卤水,通过控制注水量,做到注采平衡,能较好地解决卤水不能返出地面的问题,并进一步提高矿石采收率,获得了较大的经济效益。

6.3 几种常见水采技术的基本工艺

6.3.1 单井对流法

如图6-8所示,单井对流法的溶解作用分为三个阶段:

水沿管状井壁向上冲刷,形成梨形溶腔(图中Ⅰ部分);

注入的溶剂与充满井管周围空间的溶液混合向上回流,溶洞发展成圆柱状(图中Ⅱ部分);

溶洞进一步扩大,溶洞内的卤水在垂直方向产生分异,上部溶解速度大,下部溶解速度小,逐步形成倒锥体状(图中Ⅲ部分)。

单井对流法的基本工艺流程为:

盐井布置→中心管安装→井口装置→设备选择及盐井参数选择

①盐井布置。

矿床埋深较浅,应防止过早的大面积连通。为防止地面下沉,必须计算确定各矿段之间的保安矿柱尺寸;矿床埋深大于安全深度时,盐井间距一般按最大溶腔半径的两倍布置。

为提高采收率,单井可以采取在矿层下部连通的方式实现多井生产。当然,如果生产形成的溶腔将用作地下仓库,则必须保留足够大的井间距。

②中心管安装。

中心管应下入盐矿层的下部。若盐矿层厚度为8~10 m,中心管管鞋距离盐层底部0.2~0.5 m;若盐矿层厚度为1~2 m,中心管管鞋距离盐层底部0.2~0.3 m。

中心管径的大小与钻孔中技术套管的直径有关。中心管内的容积和中心管与技术套管之

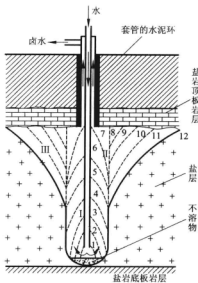


图6-8 单井对流法井下溶腔形状示意图

间环隙容积的比值应控制在 1.12 ~ 3.79 之间。

③井口装置。

如图 6-9 所示, 单井对流法井口装置主要由中心管头、闸门、法兰、三通、四通、端节和压力表等组成。井口装置的作用是悬挂内管柱、控制注入溶剂和排出卤水量、记录溶剂的注入压力与出卤水头压力。

④设备选择及盐井参数选择。

盐井生产的主要设备是泵。泵的选择决定于井径、井深和产量。

选择泵时, 应考虑泵的功率和泵的压力。

泵的功率由下式计算:

$$N = \frac{10Q\gamma h}{75\eta}$$

式中: N ——泵的功率, hp;

Q ——泵的流量, kg/s;

γ ——流体的密度, g/cm³;

h ——总的水头损失, m;

η ——泵效率, 一般取 0.7。

泵的压力 p 等于盐井生产循环时总的压力损失之和, 由下式计算:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 \quad (\text{MPa})$$

式中 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 分别是管线的压力损失、中心管和技术套管环隙空间压力损失、局部阻力损失以及水头压力损失。其计算式分别介绍如下:

$$p_1 = 8.26\lambda \frac{Q^2}{d^5} L$$

式中: λ ——阻力系数, 当液体密度等于 1.25 ~ 1.5 g/cm³ 时, $\lambda = 0.018 \sim 0.020$; 对于水, $\lambda = 0.017 \sim 0.020$; 一般取 0.02;

Q ——流体排量, kg/s;

d ——管径内径, cm;

L ——管线长度, m。

$$p_2 = 8.26\lambda \frac{Q^2 \cdot \gamma}{(D - d_h)(D^2 - d_h^2)}$$

式中: d_h ——中心管径, cm;

D ——套管内径, cm;

Q ——流体排量, kg/s;

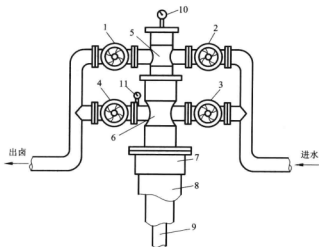


图 6-9 单井对流法井口装置示意图

1、2、3、4—阀门；5—水管上四通；6—套管下四通；7—表层套管
8—技术套管；9—生产水管；10、11—压力表

γ ——环隙流体的密度, g/cm^3 ;

λ ——阻力系数, 取 0.025;

L ——环隙空间管子长度。

$$p_3 = 0.08333\gamma\zeta \frac{Q^2}{D^4}$$

式中: γ ——流体密度, g/cm^3 ;

ζ ——局部阻力系数, 三山接头 $\zeta = 0.578$; 垫圈 $\zeta = 1.2$; 弯头 $\zeta = 1.25$; 三通 $\zeta = 2.6$;
闸门 $\zeta = 6$;

Q ——流体排量, kg/s ;

D ——接头内径, cm 。

$$p_4 = \frac{h\gamma}{100}$$

式中: h ——水头高度, m ;

γ ——出卤水相对密度, g/cm^3 。

盐井参数包括盐井井底压力、流体流动速度、进出水比值、溶解速度与产量的关系、盐井产卤能力等。

正循环时(中心管注入溶剂, 中心管与技术套管环形间隙出卤水)盐井井底压力 p_0 :

$$p_0 = \frac{H\gamma}{100} + p_2 + p_5$$

式中: H ——井深, m ;

γ ——流体相对密度, g/cm^3 ;

p_2 ——中心管和套管环形空间的压力损失, MPa ;

p_5 ——出卤管的井回压力, MPa 。

反循环时(中心管与技术套管环形间隙注入溶剂, 中心管出卤水)盐井井底压力 p_0 :

$$p_0 = \frac{H\gamma}{100} + p_2 + p_6$$

式中: H ——井深, m ;

γ ——流体相对密度, g/cm^3 ;

p_2 ——中心管和套管环形空间的压力损失, MPa ;

p_6 ——中心管的压力损失, MPa 。

中心管中的流体流动速度 v_1 , m/s :

$$v_1 = \frac{Q_1}{F_1}$$

式中: Q_1 ——中心管内流量, m^3/s ;

F_1 ——中心管截面积, m^2 。

中心管和套管环形空间的流体流动速度 v_2 , m/s :

$$v_2 = \frac{Q_2}{0.7854(d_1^2 - d_0^2)}$$

式中: Q_2 ——中心管和套管环形空间内的流量, m^3/s ;

F_1 ——中心管和套管环形间隙的截面积, m^2 ;

d_1 ——套管内径, m ;

d_0 ——中心管外径, m 。

进出水比值指注入溶剂量(m^3/d)与日出卤水量(m^3/d)的百分比。

卤水产量 $Q(\text{t/d})$ 与溶解速度 $v(\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}))$ 及有效溶蚀面积 $F(\text{m}^2)$ 直接相关, 计算式为:

$$Q = \frac{v \cdot F}{41.67}$$

年产盐能力 $A(\text{t/a})$ 可按下式计算:

$$A = Q_0 C n$$

式中: Q_0 ——平均日产卤水量, m^3/d ;

C ——平均卤水含盐量, t/m^3 ;

n ——年工作日数, d 。

6.3.2 油(气)垫单井对流法

该方法的基本原理是利用油或气不溶解盐的特性, 在开始建槽时, 向井内注入油或气, 使溶腔顶部水平方向形成一个很薄的圆盘形不溶盐的隔离层, 然后按盐层厚度进行自下而上的溶解开采。油(气)垫法能大大提高矿石的采收率和盐井的经济效益。

油(气)垫法井内的操作管分为两层同心管(参见图6-10)。中心管直径尽可能大些, 以减少流体的摩擦损失和对低品位矿盐起到排砂、砾的作用。技术套管与环形管间隙(外环隙), 用来输送油或气体垫层材料, 在保证能方便上下电缆和喷嘴的前提下, 为了节省充填环隙的油(气), 应尽可能小些。环形管与中心管的间隙(内环隙)的流体阻力应与中心管内流体阻力近似, 一般内环隙截面积应比中心管截面积大一倍以上。

环形管和中心管均下入盐层下部。中心管在环形管之下, 两管之间距离相当于预定建槽的高度(一般建槽高度为1.5 m)。它与盐层厚度有关。

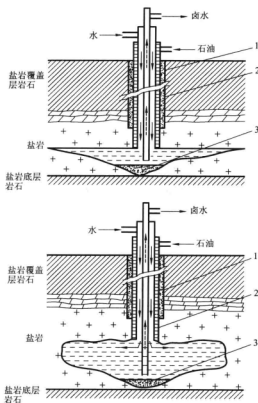


图6-10 油垫建槽溶解高度变化示意图

1—套管下入位置; 2—管间环隙的石油;

3—不溶物沉淀

在环形管下端有一个导向管, 管鞋在水平方向钻有长条形水眼, 中心管在两口距之上

一接箍与之紧密结合,这样就使由环形管注入的溶剂改变为水平方向缓慢进入溶腔。

如图6-11所示,油垫单井对流的盐井井口由三层管径组成,除了一般单井作业控制液流正、反循环的四个闸门外,还有一个与技术套管连接的注油(气)用的控制闸门。

盐井生产主要分为建槽和上溶生产两个阶段。

建槽阶段是通过油(气)垫层对盐层顶部形成的保护作用,在盐层底部先造成一扁平盐槽。盐槽直径越大,对后期的上溶生产越有利,生产效果越好。

建槽工作分三步完成:①从中心管注入溶剂,环形管抽出卤水,持续约一个半月,盐槽直径10 m左右;②提升井管,从环形管注入溶剂,中心管抽出卤水,持续约三个半月,盐槽直径30~50 m左右;③继续提升井管,仍从环形管注入溶剂,中心管抽出卤水,持续约一年,盐槽直径100 m左右。

盐槽直径与盐槽高度的比值,应根据盐层厚度和矿石品位而定。实际经验表明,对于厚度不大的高品位矿区,比值应大于67:1,槽底倾角为 $1^{\circ}30'$;对于厚度大但品位低的矿区,该比值应大于10:1为宜,槽底倾角为 $11^{\circ}29'$ 。

当建槽直径达到要求后,盐井转入上溶生产阶段。此时,排除部分油(气),露出盐槽顶面,进行自下而上的分段连续上溶(图6-12)。

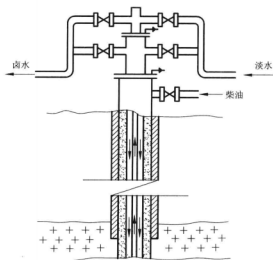


图6-11 油垫法盐井结构及地面装置示意图

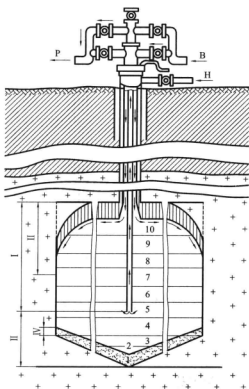


图6-12 上溶生产阶段分段连续上溶示意图

P—卤液; B—水; H—石油

分段连续上溶是通过不断地逐次提升盐井中管柱,不断加大中心管和环形管之间的距离来开采全部盐层。盐层越厚,两管距离越大,从几米到几十米不等。

油(气)垫法上溶生产的操作为反循环作业。在上溶生产阶段的溶蚀过程中,溶洞空间可分成卤水活动带(Ⅰ)、卤水形成带(Ⅱ)、卤水保存带(Ⅲ)以及充填带(Ⅳ)。

日采盐量可由下式计算:

$$g = SK(C_b - C_d)$$

式中: g ——日采盐量, t/d ;

S ——盐槽顶面积, m^2 ;

K ——溶解系数(溶蚀半径增长速度), m/h ;

C_b ——饱和含盐量, t/m^3 ;

C_d ——溶剂含盐量, t/m^3 。

6.3.3 水力压裂法

6.3.3.1 概述

如图 6-13 所示,水压裂法的实质是从一口盐井注入溶剂,迫使盐层形成裂隙与另一口井连通,反出卤水,达到溶解开采的目的。

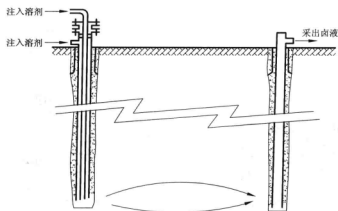


图 6-13 水力压裂在井与井之间形成有利溶解的通道

具体做法是:

先将钻井用作为溶剂的水充满,然后在地面用泵加压,直至足够高的压力使钻井周围的盐层因裂隙伸张而破坏,压裂为溶剂在盐层中的流动形成了必要的通道,盐层的溶解面积随之扩大。

水力压裂过程可分为三个不同的阶段,即压裂阶段、扩展阶段和生产阶段。

(1) 压裂阶段

向井内注水,对盐层产生挤压和溶蚀作用,压力上升到一定值,盐层中开始形成压裂裂隙,继续保持一定的水压力,压裂裂隙就能不断发展,并最终在注射井和目标井之间形成贯通。当压裂裂隙在两井之间连通,出卤井开始出卤液后,压裂建井工作即转入扩展阶段。

(2) 扩展阶段

指利用淡水的溶解作用和卤液的冲刷作用,使压裂通道扩大的过程。为保证压裂通道的迅速扩大,可采取连续注水和反向注水等方法来实现。随着注水井周围空隙的扩大,淡卤往目标井方向流动,较迅速地溶蚀、冲刷、扩展通道,最后注水压力骤降,出卤量大增,生产阶段随之而来。

(3) 生产阶段

这一阶段的压裂通道明显扩大,注水量增大,注水压力明显下降。通过注入水对盐层的溶解作用,将可溶盐类携带到地面,完成矿物开采。

显然,压裂盐井的布置是溶解开采矿山中开采设计的重要部分。

布井原则主要有:

- ① 避免井组之间的过早连通,防止井组间的生产(事故)干扰;
- ② 注意短期与长期相结合,局部与整体相统一;
- ③ 在防止地面塌陷,保证安全生产的前提下,充分利用矿产资源;
- ④ 有利于延长矿井的使用寿命。

压裂井的布置方向应充分考虑矿区本身矿、岩层的结构构造(裂隙发育方向、倾角等)和物理化学等性质,选择最利于压裂连通的方向布井,比如,选择盐层的自然节理面,并沿矿层倾斜方向(倾角大于10度的情况下)布置,但应尽量避免断层、空隙及其他障碍物。

压裂井的布置方式很多,有梅花式、三角式、成排式、条带式等。一般井距为150 m左右,压裂不易成功的地区可缩短为100~130 m。井组距要足以防止井组间的过早连通,比如,以三井为一组(三角式布井)时,组距应大于井距的两倍;对分段式布井要求的组距是井距的四倍。

生产井的数目应与矿区盐井的采卤能力和加工厂的处理能力匹配,并考虑一两对(组)备用井。

6.3.3.2 压裂盐井的基本结构

一个典型的压裂盐井一般由表层套管水泥环、表层套管、技术套管水泥环和技术套管组成(图6-14、图6-15及图6-16)。

为了确保盐层在设计压裂部位和设计的压裂方向贯通,必须合理控制压裂流体的流动方位。为此,必须合理确定以下两个参数,即:

注水井技术套管下入深度;

目标井技术套管的下入深度。

注水井技术套管下入深度一般可分为三种情形,即:

① 注水井套管下到盐层压裂部位的顶部(图6-14)。为了使水力压裂容易成功,将套管下到离矿层底板2~3 m处。

② 注水井套管下到开采盐层的顶部(图6-15)。适于矿层埋深较浅、多夹层、矿石结构松软,试验证明压裂容易实现的矿区。

③ 注水井套管下到矿层底板(图6-16)。注水井套管下到矿层底板,将矿层全部用水泥封固,然后对着选好的压裂部位,采用射孔或机械来割开套管和水泥环,使压裂部位的矿层裸露,在单一水平上造成一道锐利切口,成为产生水平压裂的最可靠保证。

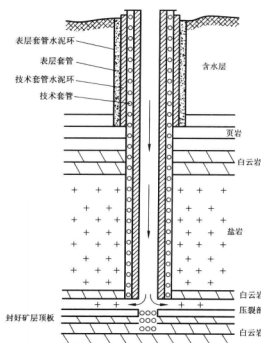


图 6-14 注入井套管下到压裂部位的顶部示意图

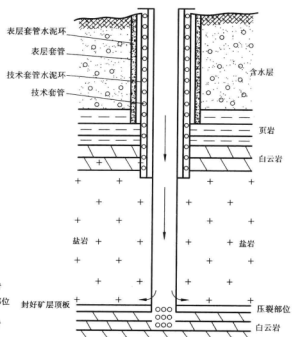


图 6-15 注入井套管下到开采盐层的顶部示意图

切口的形成可以采用下面三种不同的方法：

①对准压裂部位，用多个成形的爆炸药包进行切口作业；

②对准压裂部位用机械切口工具，割开套管和水泥环（图 6-17）；

③在单一水平上采用水加沙进行射流切口。

目标井套管的下入深度，因岩盐层的压裂条件不同，选择深度也不同。对那些易裂成功的矿区，将套管下到开采矿层与顶板接触的位置。有的矿区为了连续地逐步向上开采几个盐层，将目标井套管下到最上一个开采矿层的顶部。对压裂条件不好的矿层，如顶板易串槽或注水压裂不易成功的地方，需要从目标井进行反压时，目标井结构往往与注水井相似，以满足压裂工艺的需要。

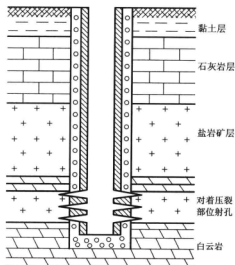


图 6-16 注入井套管下到矿层底板示意图

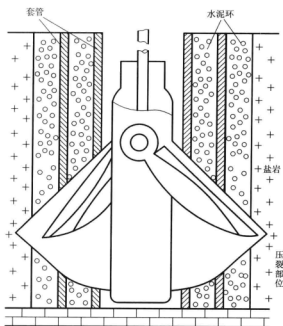


图 6-17 机械工具割开套管及水泥环进行压裂示意图

6.3.3.3 水压裂法生产中的几个基本问题

(1) 压裂部位的选择

压裂面应选择在矿层中的薄弱部位,即上下均有抗压强度较大的岩层,这样能保证压裂流体不会串槽,压裂容易成功。比如,选择在矿层底部与底板岩层交接面位置、巨厚矿层中夹石层位置或矿层底部的薄层状硬石膏和矿层互层位置。

(2) 压裂阶段的破裂压力

破裂压力受矿床埋深、矿床结构以及其他外在因素的影响。埋深与破裂压力之间虽然不是简单的函数关系,但埋深愈大破裂压力越高的趋势十分明显(表 6-2)。构造和裂隙发育程度越高及矿石质量越好,破裂压力越大。

表 6-2 破裂压力随矿床埋深加大而增高

矿床埋深/m	300	500	700	1 000
破裂压力/MPa	< 11	± 15	18 ~ 20	± 25

压裂阶段所需的最大压力 p_{\max} (MPa) 可用下式进行估算:

$$p_{\max} = p_0 + \frac{H\gamma}{100} + p_1$$

式中: p_0 ——泵压, MPa, 直接由压力表读出;

H ——矿床压裂部位的埋藏深度, m;

γ ——压裂溶剂的相对密度, g/cm^3 ;

p_1 ——水在套管中流动的阻力, MPa。

(3) 稳压阶段的注水压力

稳压阶段的注水压力不随注水量的增加而明显增大, 而是基本上保持一个相对稳定的数值, 其大小可用下面的经验公式计算:

$$p_0 = 0.0437 p_{\max} + 6.155$$

式中: p_0 ——稳定注水压力, MPa;

p_{\max} ——破裂压力, MPa。

上式计算的正常误差仅为 0.35 MPa 左右。

(4) 生产阶段的注水压力及注水量

生产阶段的注水压力值包括为克服管道阻力的压裂通道的摩擦损失以及把卤水输送到地表的最低压力值, 用下式计算:

$$p_5 = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{100} H + p_2 + p_M$$

式中: p_5 ——生产阶段的注水压力, MPa;

γ_1 ——卤水相对密度, g/cm^3 ;

γ_2 ——注入水相对密度, g/cm^3 ;

H ——井深, m;

p_2 ——通道阻力, 取 0.5 ~ 1 MPa;

p_M ——管道阻力, MPa。

压裂井投入生产后, 注水量一般总是大于出卤量。采注比(出卤量/注水量)均小于 1, 一般为 0.8 ~ 0.9。

6.4 岩盐开采的综合利用——石油储库建设

6.4.1 概述

岩盐开发不仅可以提供工业原盐, 而且如果开采得当所形成的地下盐穴还可以成为良好的储库资源, 用于储存原油、天然气、液化气等物质。

石油作为一种重要的经济资源, 它关系到国计民生; 石油作为一种重要的战略资源, 它关系到国家安全。因此, 世界各国都把获得稳定的石油来源作为大事来抓。为了规避石油风险, 确保石油供应的安全, 许多国家都通过立法建立了战略石油储备保障体系, 以备紧急情况下动用。

我国已经成为世界石油消费大国。2005 年, 我国消费石油约 3.2 亿 t, 其中国产石油约 1.8 亿 t, 进口石油 1.4 亿 t, 石油对外依存度达到 43%。“十一五”期间, 我国的石油消费将持续增长, 石油对外依存度也将会进一步提高。

我国的石油储备设施还非常薄弱, 规模偏小, 布局和结构也不尽合理。20 世纪末, 我国

资深专家建议尽快建立国家战略石油储备体系,得到了国家相关部门的高度重视。目前,国家战略石油储备规划正在编制中,首期储备基地正在浙江镇海、舟山,山东黄岛,大连岱山等地开始建设。

6.4.2 发展地下盐穴石油储库

地面石油储库其储油设施大多是金属油罐,这类储库有以下优点:一是库址可选择在长输管线、油码头等收发油比较便利的地点;二是可在原有油库的基础上进行改扩建;三是金属油罐施工简便,建设周期较短。

但这类储库也存在一些不足:油库的消防要求较高,消防投资较大,油库安全性相对较差,特别是在战争状态下易成为首要的袭击目标,金属油罐的造价较高,而且寿命相对较短,储油成本较高。

为了弥补金属油罐作为石油储库储油设施的不足,许多国家利用地下盐穴储存石油。美国的战略石油储备,采用以地下盐穴储存为主,辅以部分地上油罐的方式,每个储油点都有数量不等的岩洞及与之相连的管道和中转泵站,地上油罐设在中转泵站。储油点都通过其中转泵站与长输管道或大型装卸泊港相接,以便于原油的顺利周转,容量均可达几百万立方米。将石油储库建在地下,不仅可以确保安全,还可以节省投资。由于盐穴储库的优点比较突出,因此其推广速度很快。至今,美国已经拥有地下盐穴储库数百座,德国也拥有近百座而且数量还在不断增加。从20世纪60年代起,前苏联也开始重视地下盐穴油库的建设。

地下盐穴储库不仅可以用来储石油,也可用来储存天然气。目前世界上在役的盐穴储气库已经超过40座,其中美国有18座,德国有13座,加拿大有7座。

地下盐穴储库具有如下优点:

①投资省。储存油品时,其投资只相当于地面库的 $1/3$;储存液化气时,其投资只相当于地面库的 $1/20$ 。若是岩盐开采所形成的盐穴库,其投资则更加节省。

②占地少。一个几十万立方米盐穴的井口装置只占地几十平方米,一个 $1\,000\text{万 m}^3$ 地下盐穴储库的地面设施只占地 2万 m^2 。而一个 5万 m^3 的地面油库,不包括铁路专线即需占地 16万 m^2 。

③耗材少。钢材、水泥的消耗大大减少,而且施工方法比较简单,盐穴的构筑还可以实现自动控制。

④易存储。采用油卤置换法收发油,基本消除了油品的蒸发损耗,而且油品在盐穴长期储存不易变质。

⑤安全性好。基本上消除了盐穴内发生火灾和爆炸的可能性,更有利于战备。

地下盐穴储库存在的不足主要是:

①岩盐的分布地区与需要建储库的位置不一定相符,因而在库址选择上受到自然条件的限制。很难利用现有的铁路、港口、长输管线等储运设施等,需要新建或改扩建。

②地下情况复杂需要详细的地质勘察资料。在正常开采过程中需要有较强的勘探、开发及地面工程的技术支持。

③为达到盐穴储库的预期形状和大小,必须掌握比较复杂的溶腔控制技术并拥有先进的溶腔检测手段,还需要较多的淡水资源。

6.4.3 地下盐穴的储油机理

盐穴是指在岩盐上通过专门溶造或开采岩盐所形成的洞穴。岩盐在我国的分布范围很广,目前已经开发利用的岩盐矿藏分布在广东、四川、青海、湖北、河南、山东、陕西、安徽、江苏等省区。岩盐常埋于地下 50~1 700 m 深处,其厚度从几十米到几百米不等,而且往往面积很大。岩盐的强度很高,三向受压时强度可达 700 MPa,一般承压能力不低于 200 MPa。岩盐在高压或高温下从脆性变成塑性。在潮湿状态下,盐晶体可以弯曲。在外力长期作用下,岩盐的毛细孔会因塑性变形而闭塞,所以埋藏很深的岩盐,孔隙率和渗透率几乎为零,具有很好的气密性和液密性。岩盐与各种油品接触时不发生化学变化,不溶解,不影响油品的质量,因此盐穴作为地下储油库是一种理想的储油方法。

6.4.4 地下盐穴的构筑条件

并非所有的地下盐穴都适合构筑地下储油库,一般要求:

①要有足够的岩盐厚度。一般说来,岩盐层的厚度越大,构筑的盐穴就越大。厚度达 40~80 m 的岩盐中,可以构筑 10 万~40 万 m^3 的洞穴;厚度达 300 m 以上的岩盐层可以构筑 50 万~150 万 m^3 的洞穴。

②地下盐穴的设置深度。为平衡盐穴中所储油品或液化气的工作压力,要求每 0.1 MPa 的工作压力有 4.5 m 厚的盐穴顶部覆盖层。如果覆盖层的气密性得不到保证时,则盐穴应置于地下水位以下的一定深度,使地下水的液柱压力足以平衡洞穴中的工作压力。

③岩盐的纯度越高越好。建造地下储库的岩盐中,非水溶性杂质的含量一般不应大于 15%,最多不得超过 40%。而且构筑盐穴储库的地方要有充足的淡水,这样卤水可被充分利用或有安全的排放地点。

6.4.5 大力发展盐穴石油储库

近年来,我国井盐开采的规模已经超过 1 000 万 t/a ,且以每年近 10% 的速度递增,因此而自然形成的溶腔体积达 500 万 m^3/a 。由于我国地下盐穴用作储库未纳入战略石油储库的考虑,致使这一储存资源处于空置状态。因此,无论是从经济发展的角度,还是从保证国家能源安全的角度来看,将岩盐开采所形成的溶腔用于石油储库,尤其是用于作战略石油储库,是非常必要和可行的。

岩盐开采所形成的盐穴,用作储库是岩盐开采的次生效益,也是岩盐开采的最优路径。但目前普遍采用的粗放式的开采方式,溶腔无设计、无控制、无检测,最后形成的盐穴是不能用作储库的,从而造成储存资源的浪费。与其形成鲜明对照的是,国家还要投入巨资建设石油储库等储存设施。

为了使岩盐开采的盐穴具有可使用性,必须从采卤并施工作业开始,采取相应的技术措施,形成的溶腔符合设计要求,包括形状、顶底板厚度、密封性等,使之满足储备石油及其制品的要求。

主要技术措施有:

①要对溶腔进行设计,并采取特殊的采盐工艺,使溶腔的形状能够满足储库的要求。

②要用油或气垫层等非溶解性物质覆盖在水面,限制溶腔向上扩展,加快腔壁四周推

移,达到设计直径再使水平面往上移动。

③要定期对形成的盐穴形状用声呐装置进行测量,测出盐穴各横截面的图形,最后获得整个盐穴的立体图形并计算出盐穴的体积。

目前,我国已经拥有岩盐溶腔设计、控制及测量的基础理论及相应的技术手段,若通过试验或与欧美公司合作积累一些操作和管理经验,岩盐企业适当增加开采成本,即可将盐穴再利用。这对国家来说既充分利用了储存资源,又节约了建设石油储库的投资;对岩盐企业来说,虽然暂时增加了一点投入,但可获得长久的储备石油收益。若将此应用到全国具备构筑地下盐穴储库的盐矿,不仅可以解决我国战略石油储库的建设问题,还可解决部分企业或部门的原油、天然气、成品油及其他产品的日常储存问题,其经济意义及战略意义都是非常深远的。

第7章 硫矿资源及其开采

7.1 硫矿资源

7.1.1 概述

硫矿是一种基本化工原料。在自然界,硫是分布广泛、亲和力非常强的非金属元素,它以自然硫、硫化氢、金属硫化物及硫酸盐等多种形式存在,并形成各类硫矿床。中国硫资源十分丰富,储量排在世界前列。中国在目前及今后相当一段时期内,仍将以硫铁矿和伴生硫铁矿为主要硫源。国外硫当前主要来自天然气、石油和自然硫。

硫矿的直接应用是生产硫磺和硫酸,二者的用途非常广泛。大部分硫酸用来生产各类化肥,硫的应用领域还在不断扩大。

自然硫属斜方晶系,晶体常呈菱方双锥状或厚板状。由菱方双锥、菱方柱、板面等组成,通常呈致密块状、粒状、条带状、球状、钟乳状集合体。硫呈黄色,含杂质时呈黄棕色。金刚光泽,断口油脂光泽。性脆,不透明至半透明,硬度 $1\sim 2$,比重 $2.05\sim 2.08\text{ g/cm}^3$ 。产于火山岩、沉积岩中及硫化矿床风化带,常与方解石、白云石、石英等组合。其双锥状晶形,金刚光泽,加上黄亮鲜艳的硫黄色,与基岩形成鲜明反差,有较好观赏性(图7-1)。自然硫不导电,摩擦带负电。用手紧握硫的晶体,放在耳边,可以听见其自行碎裂的声音。自然硫见于地壳的最上部分和其表部。其形成有不同的途径。最主要是由生物化学作用形成和火山成因的自然硫矿床。自然硫一般不纯净,火山作用成因的自然硫往往含少量的Se, As, Te,其他矿床产出常夹有黏土、有机质、沥青和机械混入物等。



图7-1 自然硫

7.1.2 硫矿物基本特点

7.1.2.1 硫矿物分布及形态

自然界中含硫矿物分布非常广泛,种类也很多,以单质硫和化合态硫两种形式出现,硫的主要工业矿物和化合物有:自然硫、黄铁矿、白铁矿、磁黄铁矿、有机硫、硫化氢及有色金属硫化物中的硫。

单质硫有三种同质多相体—— α 硫、 β 硫和 γ 硫。在自然条件下,只有 α 硫最为稳定,称为自然硫。

化合态硫中可作为硫矿石的矿物主要有:黄铁矿、白铁矿、磁黄铁矿等,其中含硫量达

53.4%的黄铁矿分布最为广泛,是中国最重要的硫矿石,而白铁矿和磁黄铁矿含硫量较低,分布局限,工业意义不大。

明矾石、重晶石、石膏等硫酸盐类矿物仅在某些硫源缺乏的少数国家和地区作硫矿资源加以利用,中国还未加以利用。

(1) 自然硫

自然硫是指斜方晶系的 α 硫。化学式为S,理论含硫量为100%,此外,自然硫中通常含有一些杂质,火山岩自然硫往往含有少量砷、碲、硒和钛,沉积型自然硫常夹杂有方解石、黏土、有机质和沥青等。

自然单质硫一般为针状和板状晶体,常呈不规则块体产出。晶形很少见,通常呈致密块状,粉末状、粒状、条带状和被膜状。

自然硫为淡黄色、棕黄色,有杂质时颜色带红、绿、灰和黑色等。莫氏硬度为1~2,相对密度为2.05~2.08 g/cm³;性脆,解理不完全,断口贝壳状,具弱导电、传热性。条痕为白—黄白色,透明—半透明状,树脂—金刚光泽;燃烧时发青蓝色火焰,并有刺鼻硫磺味。耐腐蚀。在360℃和更高温度条件下硫与氧强烈作用,生成二氧化硫。在约400℃时硫与氢作用形成硫化氢,温度继续升高时则分解,在1690℃时完全分解成水和硫。硫与苛性碱液与氨溶液一起加热形成多硫化物或硫代硫酸。硫不溶于水,较易溶于有机溶剂和二硫化碳。硫作为氧化剂和还原剂出现,是化学上很活泼的元素。

(2) 黄铁矿

黄铁矿又称硫铁矿,化学式为FeS₂,其硫理论含量为53.45%,铁理论含量为46.55%。自然界产出的黄铁矿常含有钴、镍、砷、硒、锑、铜、银和金等多种金属元素。有些硫化物还可含非常微量的碲、锗等稀散元素。

黄铁矿属等轴晶系,常见晶形为立方体及五角十二面体。

黄铁矿颜色多为浅黄铜色,表面常带有褐色、黄褐色,细粉状黄铁矿集合体常呈绿黑色。硬度6.0~6.5,相对密度4.9~5.2 g/cm³。性脆,条痕为褐黑或绿黑色。强金属光泽,不透明,具弱导电性。具热电性,有的变种具检波性,断口参差不齐,偶见贝壳状断口。

(3) 白铁矿

白铁矿(FeS₂)与黄铁矿相同,二者属于同质二象复体,为斜方晶系,晶体常呈板状产出。集合体呈结核状、球状、钟乳状、皮壳状等。

白铁矿为浅黄铜色,略带浅灰或浅绿色调,新鲜面近似锡白色,条痕暗灰绿色,金属光泽。不透明,硬度为5.0~6.0,相对密度4.6~4.9 g/cm³,性脆,解理不完全,断口为参差状,具弱电性。

(4) 磁黄铁矿

磁黄铁矿[Fe_{1-x}S]为六方或单斜晶系两种同质多相变体,常呈致密粒状块体,晶体很少见,晶形呈板状。

磁黄铁矿新鲜面是古铜棕色,表面常具暗褐色、暗棕色,不透明。金属光泽。条痕灰黑色。硬度4,性脆,相对密度4.58~4.70 g/cm³。具磁性,但强弱不一。具导电性,断口为参差状至贝壳状。

7.1.2.2 硫铁矿矿石的组分及影响

(1) 硫铁矿矿石的主要有益伴生元素

中国硫铁矿床中,除部分沉积变质型矿床矿石组分比较单一、以硫铁矿为主、其他有用

组分较少外,大多数矿床都含有多种有益组分。据统计,在硫铁矿石及其氧化矿石内含有的有益伴生组分将近有15种,有:铜、金、银、镓、碲、钴、钼、锗、铈、锰等,有利于硫铁矿床的综合开发利用。

(2) 硫铁矿石的主要有害组分及影响

硫铁矿在制硫酸时的主要有害组分有:砷、氟、铅、锌、碳、钙、镁、碳酸盐等。

砷:在硫酸生产中,砷会使触媒中毒,生成氧化砷结晶,使转化率下降,并堵塞管道,造成清理困难,还容易使人中毒;排出的污水中含砷会造成环境污染。

氟:焙烧时大部分以氟化氢存在,小部分为四氟化硅。氟化氢能使触媒粉碎;四氟化硅能使触媒结块,导致触媒阻力升高,转化率降低。在酸洗流程中,生成的氢氟酸,会腐蚀砖衬里和磁环;在水洗流程中,因氟的溶解度大,大部分随污水排出,会污染饮用水和影响农作物生长。

铅锌:焙烧过程中熔点较低,易使焙烧炉产生结疤现象。

碳:含量较多时,在焙烧过程中发热很高,炉温不易控制,还要消耗较多的氧,生成一氧化碳或二氧化碳,影响转化。

钙、镁碳酸盐:硫铁矿石中的钙、镁碳酸盐脉石(白云石、方解石)使硫铁矿在焙烧过程中分解出二氧化碳气体,稀释了炉气中二氧化硫的浓度。同时,氧化钙和氧化镁还吸收部分二氧化硫形成硫酸钙和硫酸镁,降低了硫的利用率,使设备的生产能力下降。而且新形成的钙、镁硫酸盐残留在硫铁矿石的烧渣中,影响综合利用。

在制造二硫化碳人造纤维时,硫铁矿石中的沥青和砷是有害杂质。

在造纸工业中,制亚硫酸盐纸浆的硫不能含硒,因为硒会使纸发黑。

在制造火柴和炸药时,硫中不能含微量的二氧化硅杂质,因为二氧化硅会妨碍燃烧。

7.1.3 硫矿物的用途及技术经济指标

7.1.3.1 硫矿物的用途

硫矿物最主要的用途是生产硫酸和硫磺。硫酸是耗硫大户,中国约有70%以上的硫用于硫酸生产。化肥是消费硫酸的最大户,消费量占硫酸总量的70%以上,尤其是磷肥耗硫酸最多,增幅也最大。

硫酸除用于化学肥料外,还用于制作苯酚、硫酸钾等90多种化工产品;轻工系统的自行车、皮革行业;纺织系统的粘胶、纤维、维尼纶等产品;冶金系统的钢材酸洗、氟盐生产部门;石油系统的原油加工、石油催化剂、添加剂以及医药工业等都离不开硫酸。随着中国经济的发展,近年来各行业对硫酸的需求量均呈缓慢上升趋势,化肥用项是明显的增长点。

高品位硫铁矿烧渣可以回收铁等;低品位的烧渣可作水泥配料。烧渣还可以回收少量的银、金、铜、铝、锌和钴等。

硫磺除为生产硫酸的原料之外,还广泛用来生产化工产品,如硫化铜、焦亚硫酸钠等。另外,在食糖生产中,要把硫磺氧化为二氧化硫气体用于漂白脱色。在农药生产中也直接或间接使用硫磺;粘胶纤维生产中需用二硫化碳作溶剂;硫化金属矿浮选用的药剂要以二硫化碳为原料;除以上应用外,消费硫磺的行业还有火柴制造、水泥枕轨处理、医药、火药等。

7.1.3.2 技术经济指标

根据硫矿产的类型和用途,将其技术经济指标归纳如下:

(1) 自然硫

最低工业品位: 含硫量 10% ~ 25%, 大于 25% 的自然硫矿可直接焙炼; 小于 25% 的需选矿, 常用的选矿方法为浮选法。

(2) 硫铁矿石

目前工业上对硫铁矿石(包括黄铁矿、白铁矿、磁黄铁矿)的要求为:

①含硫 18% 以上的矿石可直接炼制硫磺, 含硫 25% 以上的矿石可直接入炉焙烧, 若矿石含硫能达到 38% 以上, 其炉渣经过处理可综合利用, 作炼铁的原料。

②矿石品级划分。Ⅰ级品含硫 > 35%; Ⅱ级品含硫: 25% ~ 35%; Ⅲ级品含硫: 12% ~ 25%。

③对制取硫酸的硫铁矿石产品的质量要求。对制取硫酸的硫铁矿石产品的质量应符合 ZBD51005-88 所规定的标准。本标准已从 1988 年 12 月 1 日开始实施。

④对制取硫酸硫精矿产品的质量要求。对用于制取硫酸和提炼硫磺的浮选硫精矿产品的质量要符合 YB733-86 标准。本标准已从 1987 年 3 月 1 日开始实施。

7.2 中国硫矿资源

7.2.1 中国硫矿资源概况

中国硫矿资源相当丰富。主要为硫铁矿, 其次为其他矿产中的伴生硫铁矿和自然硫。硫资源总量包括硫储量和硫资源量两部分。硫储量是指硫铁矿、伴生硫铁矿和自然硫经地质勘探工作获得的储量; 硫资源量包括石油、天然气、有色金属硫化物、煤、油页岩、石膏、硬石膏、明矾石和神矿中的硫及硫铁矿表外储量。据估算, 中国硫资源总量达 130 亿 t, 其中, 截至 1996 年底, 保有硫储量 14.93 亿 t, 占总资源量的 11.4%, 约 88% 以上是硫资源量。中国煤和石膏中硫资源量巨大, 单是煤中硫一项就占资源量的 74% 以上, 其次为石膏中的硫占总量的 11.3% 左右, 有色金属、石油、天然气、明矾石中的硫和硫铁矿等的表外储量共占 3.3%。

截至 1996 年底, 中国硫矿矿区数达 763 个, 保有硫储量 14.93 亿 t 硫, 其中, 硫铁矿硫储量为 8.42 亿 t, 占总量的 56.4%; 伴生硫铁矿硫储量为 3.30 亿 t, 占总量的 22.1%; 自然硫储量 3.21 亿 t, 占总量的 21.5%。

世界硫资源相当丰富, 据美国“Mineral Commodity Summaries 1996”报道, 世界硫储量基础为 35 亿 t。据研究知, 以我国 A+B+C 级储量与世界储量基础大致可进行对比。中国 1996 年底保有 A+B+C 级硫储量为 3.7 亿 t, 位于伊拉克之后居世界第 2 位。

(1) 硫铁矿

中国硫铁矿(图 7-2)储量分布于 28 个省、自治区和直辖市。截至 1996 年底, 硫铁矿矿区数有 493 个。保有储量矿石量 46.34 亿 t, 折硫量 8.42 亿 t。中国硫铁矿保有储量相对集中于西南、中南和华东三大区, 三大区储量约占硫铁矿总储量的 80%。从分布的省份来看, 主要集中于四川、安徽、广东、内蒙古、云南、贵州、江西、山西、河南和湖南等省(区)。从硫铁矿资源的质量来看, 含 S > 35% 的硫铁矿富矿仅占总量 3.3%, 绝大多数集中在广东省和安徽省, 其中近 66% 在广东, 30% 在安徽, 只有约 4% 的富矿分布的其他省份。

(2) 伴生硫铁矿

伴生硫铁矿分布于中国的 27 个省、自治区和直辖市。截至 1996 年底, 中国伴生硫铁矿

矿区数有 260 个, 硫储量为 3.3 亿 t。主要集中于江西、陕西、甘肃、吉林、安徽、云南等省。其中, 江西伴生硫铁矿硫储量居全国之首, 占总伴生硫储量的 27.69%。

(3) 自然硫

中国自然硫储量主要分布在山东、西藏、青海和新疆。截至 1996 年底, 自然硫矿区共有 10 个, 其中: 山东 2 个, 西藏 1 个, 青海 6 个, 新疆 1 个; 硫储量有 3.21 亿 t, 主要集中在山东泰安宋家庄和山东大汶口两个矿区中, 其硫储量为 3.11 亿 t, 占中国自然硫储量的 99.62%。青海、西藏、新疆三省(区)储量合计仅占 0.38%。

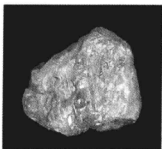


图 7-2 硫矿石

7.2.2 中国硫矿资源特点

中国硫矿资源具有以下 5 方面的特点:

(1) 硫资源构成以硫铁矿为主

中国硫资源构成与世界硫资源相比有较大差别。在世界硫资源构成中, 石油与天然气中硫占较大比例, 是硫的主要来源。与世界硫资源相比, 中国石油多数为低硫油, 酸性天然气主要产于四川威远一带的气田中, 油气中硫资源量合计占中国硫资源量的 0.12%。而中国的硫铁矿资源在世界上的丰富程度却居首位, 遥遥领先于世界其他所有国家; 除单独的硫铁矿、伴生硫铁矿外, 煤系中的硫资源也主要是以硫铁矿的形式存在, 仅这三部分硫铁矿资源量就占中国硫资源量的 83.4%。

从中国硫储量来看, 目前硫储量由硫铁矿硫、伴生硫铁矿硫和自然硫构成。而自然硫因采选技术尚处于试验阶段, 短期内还难以开发利用。所以硫铁矿和伴生硫铁矿是中国当前以至今后相当一段时期的主要硫源。

(2) 中国硫资源富矿少、贫矿多

截至 1996 年底, 中国硫铁矿矿石储量达 46.34 亿 t。而硫品位大于 35% 的 I 级品位仅占硫铁矿储量的 3.7%, 有 96.3% 的硫铁矿矿石属于含硫 12% ~ 35% 的中低品位矿石, 而且含硫在 12% ~ 20% 的贫矿所占比重较大。硫铁矿矿石含硫平均品位在 20% 以下。中国伴生硫铁矿品位相差很大, 最低的含硫在 1.5% ~ 3.0%, 最高的达 42.78%, 一般为 10% ~ 30%, 平均品位为 3.67%。

中国自然硫矿床硫含量大多较低, 目前仅有青海硫磺山在小规模开采, 其余尚未利用。

(3) 共生和伴生有多种有益组分

中国硫铁矿床中大多数都伴生、共生有多种有益组分, 如夕卡岩型、热液型、火山岩型矿床都伴生有铜、铅、锌、钼、金、银、钴、镓、硒、碲、镉、锗、铀等有色、贵金属及稀有分散元素; 沉积型矿床伴生和共生有铁、锰、煤、铝土矿和黏土矿等矿产, 有利于综合开发和回收利用。有些矿石中含有偏高的对硫酸生产有害的砷和汞等杂质。

(4) 开采条件差

中国绝大多数硫铁矿床需要进行地下开采, 适合地下开采矿石储量约占硫铁矿总储量的 65%; 而开采条件较好, 适合露采的矿石储量仅占硫铁矿总储量的 15% 左右。目前, 仅有

广东云浮大降坪、广东英德红岩、安徽马山等少数矿区的浅部资源可露采。伴生硫铁矿资源适合露采和地下开采的各占一半左右。

(5) 矿石可选性好

目前中国采用的硫铁矿选矿方法主要是浮选法,少数采用重选法。根据沉积变质型、煤系地层沉积型和热液充填交代型矿床的硫铁矿矿石选矿试验结果来看,把硫铁矿选至含硫大于或等于 35% 的硫精矿,技术上是可行的,社会经济效益好,同时还可以综合回收铜、金、银等有用元素,减少运输费用。

7.3 常见硫矿床的地质特征

本节主要讨论硫铁矿、伴生硫铁矿、自然硫及酸性天然气等几种制取硫磺或硫酸的主要矿产的地质特征。

7.3.1 硫矿床的时空分布规律

中国硫铁矿矿床成矿时期多,延续时间长,空间分布广泛。中国硫铁矿可初步划分为 14 个成矿区,主要成矿带是:内蒙古狼山渣尔泰群沉积变质型硫铁矿成矿带;晋豫中石炭统煤系地层沉积硫铁矿成矿带;鲁西下第三系自然硫成矿区;川滇黔上二叠统煤系地层沉积型硫铁矿成矿带;长江中下游(伴生)硫铁矿成矿带;闽粤湘赣桂(伴生)硫铁矿成矿带等。

(1) 元古宙

在元古宙的前震旦纪,辽宁鞍山地区的辽河大桥组和宽甸群的里尔峪组,赋存有沉积再造和海相火山岩矿床;冀南的阜平群赋存着海相火山岩矿床。元古宙的震旦纪具有重要的工业意义。如产于华北地区高于庄组、狼山区的渣尔泰群和浙江、安徽、湖南、福建等省的陡山沱组的有色金属、多金属硫铁矿床等,多为中大型矿床。

(2) 古生代

古生代的寒武系产有沉积型黄铁矿,如浙西南的荷塘组黄铁矿床。寒武系是中国海相火山岩型铜-硫铁矿的主要含矿层位之一,著名的甘肃白银矿床即产在下寒武统白银组。中国最重要的黄铁矿成矿期为泥盆纪,产出的黄铁矿床数量多,规模较大,分布集中,为碳酸盐岩建造,其含矿地层分布地区为粤北-湘中、湘西南的棋子桥组,川北龙门山南麓的观雾山组,甘南猫儿川组,桂东南的郁江组、东岗岭组,陕中的大西沟组等。古生代的石炭纪为中国黄铁矿的重要成矿时期,在中石炭统底部赋存有煤系沉积型黄铁矿,矿床分布在辽中、鲁西、内蒙古南部、豫西北、晋东南等地。在西南地区,二叠纪亦是重要的煤系沉积型黄铁矿矿床成矿时期,分布于川、滇、黔及桂西南的煤系沉积黄铁矿矿床,皆产在二叠纪乐平统底部。

(3) 中生代

在中生代的三叠纪、侏罗纪,有少数中小型黄铁矿矿床分布于长江中下游地区,在中生代的白垩纪,有陆相火山岩黄铁矿-铁矿床分布于中国东部沿海地区。特别是长江中下游的宁芜、庐枞地区的白垩纪火山岩系内。另外,广东西部的白垩系钙质砾岩内有接触交代型黄铁矿矿床。

(4) 新生代

在吉林中部地区第三纪地层中有煤系沉积型黄铁矿矿床生成。在自然硫矿床中,火山喷

气型自然硫矿床的形成多与火山活动有关,常见于在第三纪以来,特别是现代火山活动地区,自然硫多聚集于熔岩和火山凝灰质堆积物的裂隙和孔穴中。沉积型自然硫矿床规模大,是自然硫矿床的主要类型。如第三纪山东泰安自然硫矿床。

7.3.2 硫矿床的矿床类型

中国硫铁矿矿床成因类型有沉积矿床、热液矿床等。但最主要的是喷流沉积矿床。硫矿床分类可以从成矿物质来源出发来完成。

7.3.2.1 物质来自地球表部

(1) 含煤地层或非含煤地层中沉积硫铁矿矿床

①含煤地层中沉积硫铁矿矿床这类沉积硫铁矿矿床数目较多,总储量大,在中国分布范围广、层位多、面积大,产状平缓,但其矿石品位较低,矿层厚度较薄,难以用机械化大规模开采。

这类矿床绝大多数产在煤系地层底部,个别的夹在煤系中部。含矿煤系主要有北方的本溪统与西南地区的上二叠统;其次是鄂中的马鞍煤系(下二叠统)和吉林中部的桦甸组(第三系)。矿床一般有1~3层硫铁矿层,连续性较好,但矿层内工业硫铁矿矿体常常是不连续的,一般矿层厚度较小。

②非含煤地层中沉积硫铁矿矿床非含煤地层中的硫铁矿一般含硫品位中等,矿种以单一硫铁矿矿床为主,其次为硫铁多金属矿床。矿床一般赋存在含矿地层的中下部,矿床规模大、中、小均有,少数矿床规模巨大,矿床主要分布在冀北、内蒙古西部、湘南-粤北、粤西、川北、浙西、闽西南等地。

(2) 蒸发岩盆地中的自然硫及酸性天然气

(1)自然硫矿床 蒸发岩盆地内的自然硫矿床主要出现在在中新生代古隆起边缘凹陷带或断陷盆地中,矿层为层状、似层状或透镜状,具有较大的远景,比如山东泰安汶东盆地的自然硫等矿床。

(2)酸性天然气矿床 酸性天然气是指含硫化氢的游离氢化合物气体。在标准状况下硫化氢是一种非烃类剧毒性的酸性气体,常与烃类、二氧化碳共存,可溶解于石油或地下水中。含 H_2S 0.1%以上的天然气具有工业应用价值。

中国的酸性气田多分布于扬子准地台西部,产层为震旦系、三叠系和侏罗系,以天然气为主,含 H_2S 5%~6%,最高为10%左右。以四川威远最为集中。其次为产于第三系的河北赵兰庄高硫气田。

7.3.2.2 物质来自地球内部的硫矿床

(1) 大陆火山-气液矿床

①近代火山型自然硫矿床。火山成因的自然硫矿床在地球上分布较广,在火山地区多见。中国火山型自然硫主要分布在东部和西部,但已知矿床不多,仅有台湾大屯火山群的自然硫矿床,以及产于深断裂附近的青海硫磺山矿床等。

②火山构造沉陷型硫铁矿矿床。火山构造沉陷型硫铁矿矿床分布于川、滇、黔三省交界地区,大致沿“康滇地轴”南北向断裂构造带和与之有关的峨眉山玄武岩分布区。硫铁矿体有的呈透镜状或似层状产于峨眉山玄武岩中,有的产于二叠系龙潭组地层底部与茅口灰岩之间,如“川南煤系硫铁矿”。

③火山岩盆地型玢岩硫铁矿床。这是中国硫铁矿的一种重要矿床类型。主要分布在长江中下游及东南沿海一带燕山运动中晚期的断陷盆地中,以宁芜庐枞和繁昌地区为代表,是受火山喷发-浅源岩浆活动共同控制的一套由海相转为海陆交替相至陆相的庞大的矿床组合。在宁芜中生代火山岩盆地,黄铁矿床常围绕玢岩铁矿带外缘分布,形成有机联系的“卫星矿带”,各类型黄铁矿床的形成与铁矿受次火山热液活动控制,只因物化条件不同,分别在不同部位成矿。代表性矿床如安徽向山和马山硫铁矿矿床。

④热液充填硫铁矿矿床。热液充填硫铁矿矿床包括单一的脉状硫铁矿矿床和含有大量黄铁矿(含硫品位达到工业要求)的有色金属(铜、铅、锌、钨、锡等)和贵金属(金银)脉状矿床。以充填作用为其主要成矿方式,一般产于火成岩内外接触带或者附近的硅铝质围岩中。

⑤接触交代型硫铁矿矿床。矿床包括产于岩体边部接触带和岩体内部捕虏体接触带的夕卡岩矿床以及产于同样部位但夕卡岩化不发育的交代矿床。矿床的围岩岩性主要是碳酸盐类岩石,包括灰岩、白云质灰岩和白云岩,围岩时代从前震旦纪到白垩纪。此类矿床在中国主要分布于豫西、湘南、鄂东及粤西。如河南银家沟、湖南上堡、广东黑石岗、湖北巷子口等矿床。

(2) 海底火山矿床

海底火山矿床是一种最重要的黄铁矿床类型。矿床的形成与海底火山活动有关。矿床多为中型以上,矿石含硫品位较高,往往伴生有铜、铅、锌以及稀有金属和贵金属。

此类矿一般绕火山喷发中心成带或成群出现。按矿床产出的地质背景,海底火山矿床可分为4类:产在酸性火山岩中的矿床、产在基性火山岩中的矿床、产在沉积岩和深变质岩中的矿床和产于变质岩系中的硫铁矿矿床。产于变质岩系中的硫铁矿矿床工业意义最大,矿床一般为大型或特大型,如广东云浮大降坪,内蒙古东升庙、炭窑口均属这类矿床。

7.3.3 硫矿地质勘查

勘查工作分为普查、详查和勘探3个阶段。对于矿产勘查工作,一般应按规定的阶段循序渐进,对特别复杂、难以正规设计开采的矿床,可以边勘边采;个别地质条件简单的矿种或正在开采矿山外围和深部的矿床勘查阶段,也可按实际情况简化或合并,但应经有关上级主管部门批准。

硫矿的地质勘查方法一般采用地球物理探矿和钻探。我国硫矿勘探是以钻探为主,对特殊成因的矿床则用坑探或槽探。

大比例尺的地球物理探矿方法是预测硫矿远景、配合地质观察寻找含硫层位的一种有效方法,是布置钻探工作的重要依据之一,物探不仅可以确定含硫层位的空间位置,而且可对硫矿石品位进行大致定量,以弥补无岩心钻探或岩心采取率低的不足。

钻探是自然硫矿普查勘探中的最直接、最有效的方法。钻探也是圈定矿体、了解工业储量的主要方法。硫铁矿矿床的勘探方法一般是以钻探为主,对地表岩层则辅以槽探揭露。对矿石赋存条件特殊的矿床采用坑探。对煤系硫铁矿矿床也可用物理勘探。

根据矿体的形状、产状、外形的变化与内部夹石的含量及分布情况,分为形状简单、形状较简单、形状复杂、形状很复杂4类。

根据相邻工程厚度差、厚度变化的规律性及矿体的连续性划分为厚度稳定、厚度较稳定、厚度不稳定、厚度很不稳定4类。

硫铁矿体长达1 000 m以上或煤系沉积硫铁矿层面积 3 km^2 以上者为大型;矿体长度一般400~1 000 m或煤系沉积硫铁矿层面积 $1\sim 3\text{ km}^2$ 的为中型;矿体长度在400 m以下或煤系沉积硫铁矿层面积不足 1 km^2 者为小型。除按上述矿体展布情况外,还要结合矿体厚度大小综合考虑。

根据硫铁矿床构造复杂程度,划分为简单、中等、复杂3类。

根据以上因素,结合我国硫铁矿床情况,除煤系硫铁矿的Ⅲ、Ⅳ勘探类型的划分,因基础资料不足尚待研究外,硫铁矿床划分为4个勘探类型:

第一类:矿体形状简单、厚度稳定的大型煤系沉积硫铁矿矿床。

第二类:矿体形状较简单、厚度较稳定到不稳定,构造复杂的大型硫铁矿矿床;矿体形状较简单,厚度较稳定的中至大型煤系沉积硫铁矿矿床。

第三类:矿体形状复杂、厚度不稳定的中至大型硫铁矿矿床;矿体形状较简单、厚度较稳定的小型硫铁矿矿床;矿体形状较简单、厚度较稳定的中至大型煤系沉积硫铁矿矿床。

第四类:矿体形状很复杂,厚度不稳定,或形状复杂,厚度很不稳定的小型硫铁矿矿床;矿体形状很复杂,厚度很不稳定的小型至中型硫铁矿矿床。

7.4 硫矿开采

7.4.1 开拓方式

硫铁矿床开拓方式的选择,必须符合开拓工程量少、基建投资省、年经营费低、投产快、生产安全、管理集中方便的要求。

矿山是采用露天开采还是地下开采,或者联合开采,要根据各个矿床的具体赋存条件研究决定,必要时还要进行综合的技术经济比较和分析。一般来讲,露天开采的生产劳动条件比地下开采要好,矿产资源的回收率较高,在经济效益相差不大的情况下,应当尽量考虑采用露天开采。

对于地下开采,按井巷形式可分为平硐开拓、斜井开拓和竖井开拓,开拓方法应考虑先平硐,次斜井,后竖井。

7.4.2 技术要求

(1)露天开采

生产剥采比或平均剥采比应小于经济合理剥采比:根据围岩种类、硬度系数、露天采场最终阶段坡面角为 65° 左右;最终帮坡角一般为 $37^\circ\sim 47^\circ$;阶段高度:小型8~10 m,大中型10~12 m,有时大型矿亦可采用12~15 m;安全平台一般大于2 m;清扫平台一般6~12 m;运输平台(汽车):载重量7 t, 20 t, 32 t的汽车,平台宽度单线8, 9, 10 m,双线11.5, 13, 14.5 m。

(2)地下开采

地下开采应注意以下问题:

①井口和平硐位置应保证其构筑物不受地表塌陷、滑坡、山洪暴发的危害,井口标高一般在历年最高洪水水位1~3 m以上。

②井筒(或平峒)位置一般位于开采移动带以外,否则应留保安矿柱,还应考虑地表和坑内工程量少、建设快,以及到达选矿厂运输量少。

③每个矿井应有两个通往地表的安全出口;矿井的主要出口(平峒、斜井、竖井)一般应考虑留有一定的备用提升和运输能力。

④一般情况下,主要井巷均应布置在矿体下盘,以便能长期使用,只有在下盘工程地质条件恶劣时,才考虑主要井巷布置在上盘。

⑤确定矿山主要井巷断面时,除考虑生产能力、设备外形尺寸和必要的间隙外,还应考虑通风、排水、压气管路和供电线路等敷设要求。大型矿山更应预留有一定管、缆位置,以备扩大生产之需。

⑥位于地震区的矿山,应将矿井抗震列为设计的重要内容。

根据我国硫铁矿矿床赋存特点及其围岩情况,绝大部分采用地下开采,少数露采。适宜露天开采的硫铁矿有:广东云浮硫铁矿、英德硫铁矿和山东五莲县钓鱼台硫铁矿。

地下开采的硫铁矿多采用崩落法,包括有底柱分段崩落法、无底柱分段崩落法、分层崩落法等。还可采用空场法采矿,即分段采矿法。

7.4.3 选矿与加工

硫铁矿是我国最主要的硫源和开发利用对象,据1996年储量统计,矿石的平均品位18.18%,属中低品位的硫铁矿,要开发利用,必须进行选矿加工。硫铁矿矿石的主要选矿方法是浮选,其次为重选法、磁选法或浮-磁联合流程。具体选矿实例如下:

(1) 广东云浮硫铁矿矿石的选矿

云浮硫铁矿为一大型露天采选联合企业,设计规模为年产原矿石300万t,其中150万t贫矿石入选。而含硫品位36.75%的富矿,经破碎加工得粒度小于3mm的产品。

云浮硫铁矿矿石由于含碳,颜色呈黑色、褐色,有用矿物主要是黄铁矿,其次为白铁矿、磁黄铁矿、褐铁矿,少量的闪锌矿、黄铜矿。脉石矿物有石英、方解石、绢云母、碳质等。矿石构造以条带状为主,块状、浸染状其次。

选矿厂设计为一段粗碎,磨矿采用湿式自磨与格子型球磨联合,分级机使用 $\phi 2400$ mm高堰式双螺旋分级机,浮选为一粗二精二扫流程,硫精矿浓缩过滤。贫矿石的选矿工艺流程及药剂制度,经过数年的生产实践改进,贫矿石的选矿浮选流程现在改为二粗一精一扫。

选矿厂规模150万t/a,选矿比2.16,使用常规浮选药剂乙基黄药和2[#]油,获得的硫精矿含硫40%,回收率92.5%。每吨原矿耗电21.75 kW·h。自磨机中使用了橡胶衬板。

(2) 内蒙古炭窑口硫铁矿选矿

炭窑口硫铁矿位于内蒙古自治区巴彦淖尔盟,属变质岩中的多金属硫化矿床。采选规模120万t/a。

原矿中有用矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿、磁铁矿和方铅矿。脉石矿物主要有方解石、白云石和石英,其次有长石、绿泥石、云母等。

黄铁矿多与磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿紧密共生,浸染状结构;黄铜矿多呈不规则状充填于早期矿物间隙,还有部分黄铜矿在闪锌矿中呈乳滴状结构;闪锌矿呈他形晶充填或呈浸染状分布于脉石中;磁黄铁矿呈乳滴状分布于闪锌矿中。原矿主要有铜硫矿石和硫锌矿石两种类型,矿石中有铜、锌主要呈原生硫化物存在,次生铜和铜锌氧化物较少。

两种矿石类型经过多方案的选矿试验,串流浮选工艺流程比两种矿石的单独分选有显著的优越性,故而在选矿厂的设计中采用了串流浮选工艺。试验的矿石为硫锌矿石:铜硫矿石=2:1混合后浮选。采用无氰工艺,用 Na_2SO_3 代替 NaHSO_3 分选效果相当。串流浮选工艺流程见图4.5.9。串流浮选工艺流程结果见表4.5.11。

(3) 硫磺矿的选矿

自然硫的选矿实例不多,目前仅收集到化学工业部连云港设计研究院对青海天峻县硫磺山甘沟矿区的1 t/d规模的浮选法中间试验结果。主要组成矿物有:自然硫、石膏、石英、玉髓等。中间试验以4个类型矿石的混合样为研究对象,含硫52%,浮选细度-200目84.84%,浮选浓度22%。添加2 kg/t水玻璃和2[#]油18 g/t。试验能够得到含硫83.89%的精矿,回收率可达94.62%。

另外,自然硫矿石炼制硫磺后的尾渣,约含硫15%,加煤油83.35 g/t进行选矿,可获含硫61.23%的粗精矿,回收率72.08%。

7.5 自然硫矿床的钻孔热熔法开采

自然硫矿床的开采在19世纪90年代以前都是采用常规的地下或露天开采。但由于硫化氢气体的危害,使传统的地下开采发生困难,而沿用露天开采又受到矿床赋存条件的限制。随着人类对自然界的认识的深化和采矿技术的不断发展,德国人Frasch首先提出了用钻孔热熔法(弗拉施采矿法)来开采自然硫矿并获得成功。在推广应用过程中,对该方法进行了必要的改良,不断融入新的技术与工艺,弗拉施采矿法已经先后在墨西哥、波兰、伊拉克、前苏联等获得成功。

7.5.1 钻孔热熔法基本要素

弗拉施采矿法(Frasch method)的实质是从钻孔压入过热水,熔融地下自然硫,从同一钻孔排出地表,进行加工的采硫法。1894年,德国人弗拉施(H. Frasch)在美国设计出古典弗拉施采矿法,1903年改进完善。1957年波兰工程师查季威兹(B. Zakjewicz)研究成功改良弗拉施采矿法,在伊拉克的米什拉克(Mishrag)等矿实践多年,臻于完善。1975年发达国家用此法采出的硫占总产量的29.2%。弗拉施采矿法的主要优点是生产安全,投资省,建设快,工艺简单,生产效率高,开采深度大,占农田少,无尾矿及其污染问题;缺点是回采率低(一般为40%~70%),热效率差(一般为0.5%~5%),耗水量大。

(1) 古典弗拉施法

用于开采盐丘型自然硫矿床。这类矿床多赋存于不透水岩层中,状如山丘,自然形成基本隔热的封闭条件。该法自地表打直径250~300 mm的钻孔,钻穿矿层进入底板,作为采硫井。井内套装一组同心钢管(压气管、升硫管、热水管和表层套管),用以注压气、升硫、注过热水和保护井壁。将160℃的过热水沿热水管注入矿床,熔融的自然硫与熔融的液态硫积聚在井底的溶腔中。自压气管压入压缩空气和液态硫混合,利用空气升液原理将液态硫从升硫管中举升出来(图7-3)。

弗拉施法最宜用于有可靠水源和廉价燃料供应的大型自然硫矿床。影响开采经济效益的地质条件有储量、品位、矿床赋存深度、孔隙度、渗透率和覆盖层厚度等。

①矿床品位直接影响回收率。平均品位大于20%的富矿，回收率可达75%，品位10%的贫矿只达40%~50%。开采中，低品位的致密薄矿床时，可采品位随矿层厚度的增大而降低。

②矿床赋存深度最好保持住足够的井底压力，防止注入的过热水沸腾、气化，使熔融硫沉淀。目前经济合理的开采深度为50~600 m，条件好的富矿床可达800~1 000 m。

③一般要求矿床有15%~20%的孔隙度，顶底板有一定密封性，以利热水渗流，加速硫的熔融，减少热量流失。

(2) 改良弗拉施法

用于开采蒸发盐型沉积自然硫矿床。这类矿床的矿层多而薄，呈不规则层状或透镜状，厚度从几厘米到几米，延深广阔，封闭性不好，隔热条件极差，矿层常很致密，渗透性差。开采这类矿床须采取预先爆破和充填处理措施。进行采前地下预爆破可增加开采区段的渗透性，形成垂直方向的隔离层，起截流或隔离老采空区的作用。在开采过程中，于采矿前进方向的不透水区实施爆破，可使热水流入下一个开采区段，进行矿层预热。自钻孔向矿层顶，底板岩层充填泥浆，可堵塞过热水渗漏通道，造成开采区段的封闭条件。采硫井结构与古典弗拉施法相同。

120~158℃是熔融硫流动的最佳温度。低于119.3℃时，液态硫开始结晶。高于158℃时，粘度急剧增大。因此，须严格控制地下开采区段的温度。自排水井排出的水的温度通常保持在70~80℃。排出的热水经净化后回收复用。

7.5.2 钻孔热熔法的优缺点及适用条件

钻孔热熔法的主要优点：

- ①可以开采常规方法不能开采的矿床，能获得含硫99.5%以上的液硫产品；
- ②没有繁重的井巷工程与提升、破碎、加工等工序，基建省、建设周期短；
- ③全部在地表控制生产，矿山易于实现自动化、现代化作业；
- ④能减轻环境污染。

钻孔热熔法的主要缺点：

- ①对矿床开采条件有要求，适应范围不广；

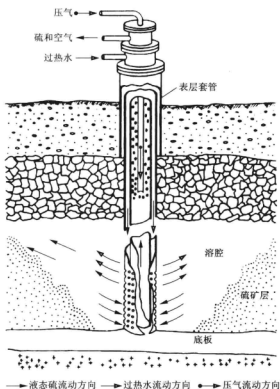


图7-3 Frasch Method 采硫示意图

②地下热效率较低,硫的采收率较低。

钻孔热熔法对矿床开采条件方面的要求分为对矿床本身的要求以及对外部条件的要求。对矿床本身的要求主要为:

①含硫品位不低于18%~20%;

②回收硫矿石总量应不低于100~300万t,最好拥有1000万t以上的可回收硫;

③合理的开采深度一般为120~500m之间,因为过浅难以形成足以防止矿井水涌出的矿山压力,过深则矿井建设费用高,不经济;

④从工艺和经济要求出发,要求矿层厚度应不小于5m,开采的最佳厚度为15~30m之间;

⑤为保证热熔法采硫工艺的效率,矿床应具有合理的孔隙度和渗透性能,一般要求矿层的均匀孔隙度为10%~15%,渗透系数应大于0.4m/d;

⑥矿层顶底板应具有良好的封闭性。

对外部条件的要求有两点:

①矿区应有足够可靠的水源。

加压的过热水(160℃)是热熔法采硫工艺中的开采工具,因此矿区足够可靠的水源是设计使用热熔法采硫的必要条件之一。

②燃料供应不成问题。

由于生产工艺过程中热效率不高,好的矿山也只有5%,因此,需要消耗大量的燃料来加热作为开采工具的载体——水,所以,廉价而充足的燃料供应成为另一个关系到热熔法采硫能否成功的关键因素。

7.5.3 钻孔热熔法的开采系统

简单地讲,钻孔热液法采硫包括三大步骤:制热、注热和抽硫。如图7-4所示,整个开采系统由地面设施和各种钻井组成。地面设施又包括生产技术设施和行政管理、生产福利设施。各种钻井是钻孔热液法采硫的关键,一般应包括生产井、排水井、观测井、地质井和水文地质井。

生产井指直接用于注热采硫的钻井,一般设两层套管,即表层套管和技术套管,图7-5为生产井的井底结构示意图。

排水井的用途是排除矿化水、保持矿层正常压力,以扩大生产井或井区的开采范围;观测井是系统地观测采硫工艺过程和评价生产井工作效果的钻井;地质井的主要用途是用于详细确定矿层参数的钻井;水文地质井主要用于测定矿层各部位之间的水力联系条件,以便确定采硫时热水在矿层中的流动部位及各部位的进出水量。

钻孔热熔法开采系统的布置形式主要有井群式、分区开采式和单线推进式。

如图7-6所示,井群式开采系统以一个生产井组同时进行生产。每个井组中有一个中心井,它在周围井的配合下进行生产,排水井位于生产井组之外,呈环形布置,观察井又位于排水井的外围。

如图7-7所示,分区式开采系统中,每口井都是一个井组的中心井,同时又是另一个井组的边缘井。

如图7-8所示,在单线推进式开采系统中,生产井、排水井和观察井都按一定的几何形

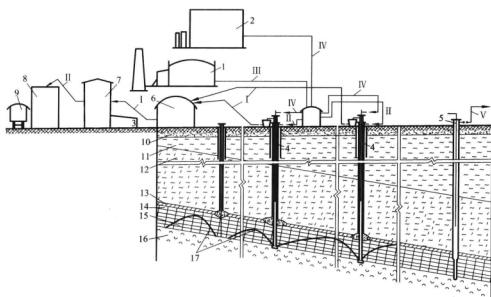


图 7-4 钻孔热液法采硫系统示意图

- 1—锅炉房；2—空压机房；3—监测站；4—开采孔；5—排水孔；6—泵流站；7—粒化车间；
8—仓库；9—装硫车；10—砂；11—黏土；12—泥灰岩；13—砂岩；14—不含硫石灰岩；
15—含硫石灰岩；16—硬石膏；17—熔硫界面；
I—液态硫；II—粒状硫；III—载热体；IV—空气；V—输送层间水到净化池的水管

状布置，并向一个方向推进。

在钻孔热熔法采硫时，不论采取何种方式的开采系统，都必须合理地确定井网的布置形式和井间距。

井网的布置形式主要包括等腰三角形井网、等边三角形井网、直角三角形井网和正方形或矩形井网。

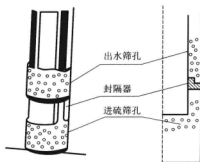


图 7-5 生产井井底结构

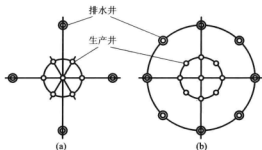


图 7-6 井群式开采系统布置示意图

在确定生产井间距的时候，一是要考虑最大限度地回收硫矿资源，二是要考虑尽量减少

钻井费用。针对每一种特定的矿床条件，每一个采硫井都会形成一个一定大小的熔融漏斗，只有漏斗范围内的矿体能被采出，而漏斗范围外的矿体不能被采出，因此，理论上的井间距应小于熔融漏斗的直径。如果加密井间距，能提高硫的采收率，但会增加钻井费用，埋深越大时，钻井费用增加的速度越快。

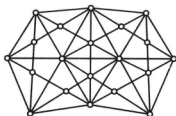


图 7-7 分区式开采系统布置示意图

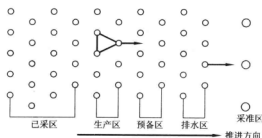


图 7-8 单向推进式开采系统布置示意图

排水井的作用是排出矿层水，使矿层卸压。一般而言，排水井与生产井之间的距离应不小于生产井之间距离的两倍。

7.5.4 钻孔热熔法的采硫工艺

采硫生产工艺(图 7-3)包括四个基本步骤，即：

- ①在热力站加热大量过热水；
- ②将过热水注入生产井熔融硫；
- ③靠压缩空气或自喷将熔硫升举出地面；
- ④将抽出地面的熔融硫降温凝固或盛入加热罐存待运。

值得指出的是，为了保证和提高生产井的采硫能力，在注入热水进行熔硫之前，一般需进行热水洗井及矿层预热工作。

热水洗井的目的是清除管道和井下沉积物与沥青，具体工作包括：

- ①从硫管注热水经排水管排出，直到出清水为止；
- ②关闭排硫阀，从热水管注热水，经排水管排出，直到出清水为止；
- ③从硫管和水管同时注热水，经排水管排出，直到出清水为止。

矿层预热是将加压的过热水同时经硫管和热水管压入井中。从硫管注入总水量的 75%，经硫管、下筛管进入下部矿层，对下部矿层进行预热。从热水管注入总水量的 25%，经热水管、上筛管进入上部矿层，预热矿层上部 and 上覆岩层。

钻孔注热 2~3 周后，加热了矿层，使硫熔融。硫在重力的作用下向孔底方向流动并聚集于孔底汇硫坑，而热水却向上运动直到被不透水的上覆岩层所阻隔。当孔底熔融硫的液面高度超过硫筛管的位置后，关闭硫阀，停止从硫管注入过热水。此时，只从热水管继续注热水熔硫，热水从上筛管注入矿层，熔硫在重力作用下继续向孔底集中，再打开排硫阀，即有水蒸气和水从此阀排出。这时，如果矿层熔硫量大于孔底汇硫量，当打开试硫阀时，将有硫与水的混合物从试硫阀排出，然后关闭试硫阀，打开排硫阀；若只有水蒸气排出，说明硫筛管

已全部被熔硫所遮盖,热水不能汇入硫坑,意味着井下采硫工艺已全部准备好,可以出硫了,便可打开压气阀,向孔中注入压缩空气。压缩空气将通过最近的路径向管外排出,排硫管中出现气塞或硫气混合物并推动熔硫向上运动,把硫举出地面。

7.6 硫矿开采与环境保护

7.6.1 硫对环境与健康的危害及其治理

(1) 固态硫

固态单质硫本身无毒性,但当它进入人体后,能与蛋白质反应生成硫化氢,在肠内被部分吸收,大量服用会出现硫化氢中毒症状。硫的粉尘也会引起眼睛结膜炎,对皮肤和呼吸道有刺激作用。硫的燃点低,能产生静电,有易燃和引起爆炸的危险。

为防止固态硫对人体的危害,要求接触固态硫的人员必须戴防护罩和防护眼镜。

(2) 液态硫

液态硫的主要危险是燃点低,易形成有毒的硫化氢,易猛烈燃烧,与皮肤接触会引起剧烈的烫伤。美国工业卫生医师协会对日常工作中接触硫化氢最大允许浓度定为 10 mg/m^3 ,美国职业安全与保健管理局规定最高浓度为 20 mg/m^3 。

7.6.2 硫铁矿对环境的危害及治理

(1) 土法炼硫磺的危害

硫铁矿炼硫磺时,生成有强烈刺激性二氧化硫气体,对眼睛和呼吸系统造成伤害,当浓度达到 $8 \sim 20 \text{ mg/m}^3$ 时,引起咳嗽和眼睛不适,当浓度超过 500 mg/m^3 时,就会危及生命。对环境的危害也是极其严重的,在土法炼硫磺地区,周围农田、山林被毁,寸草不生,废气污染严重破坏自然生态平衡。

贵州省毕节地区环境保护部门在借鉴云南镇雄县炼硫技术的基础上,对炼硫设备的导磺管长度、角度、形状、尾气调节以及入炉原料的粒度、层数等方面进行改进,对 SO_2 的治理部位、方法、原理上有新的突破。采用单炉冶炼、三级回收、废气集中排放的密闭式炼硫新炉型。新炉型炼硫达到降低环境污染的效果。

重庆市奉节县硫磺厂技术人员设计的 HQL-100 型全封闭正循环硫磺气炼炉,是一种新型的、易操作的炼磺设备,已形成规模生产。该炼磺法无废气污染,大大减轻了炼磺对环境的污染与对人体的危害。

(2) 酸雨对环境的危害

据环境保护部门的监测,我国已有 30% 的国土面积被酸雨覆盖,对农作物和人畜的健康都造成一定危害。燃煤、石化行业生产过程中和炼硫磺过程中产生的硫化物是造成酸雨的重要原因。中国石化总公司在 20 世纪 80 年代末就开展了技术攻关。目前,我国的硫磺回收技术及能力有较大进展,减少了硫化物的排放量,部分地遏制了酸雨的生成。

7.6.3 硫铁矿矿山酸性水对环境的污染及治理

硫铁矿遇水很快就生成酸性水,如对云浮硫铁矿矿山常年观测,废石场和大台水库的 pH

年平均在3.5左右。云浮硫铁矿矿山采取了严格控制酸性水的措施,积极治理酸性水,对生产的全过程加强管理,加强综合治理。

对污染源的预防是治本的措施,对采场和废石场的来水进行拦截,减少产生酸性水的量;封闭矿石表面,隔绝与空气和水分的接触;选矿合理配矿,以减少酸性水的产生。

尽管采取一些综合治理方法,但酸性水的产生仍不可避免,云浮硫铁矿矿山对简单型酸性水的治理,是采用倒锥型旋流池石灰石粉一段中和酸性水工艺。可将水质pH从3.0升至6.5左右,再经多级平流式沉淀池澄清,水质完全能达到国家工业污水排放标准。

对复杂型酸性水(锰、锌、铁的含量特别高的酸性水)采用两段中和工艺,即第一段采用倒锥旋流池石灰石粉中和,pH由3.0上升至4.5左右,第二段投生石灰用滚筒或搅拌槽中和处理,经平流式沉淀式澄清后排放。1992年云浮建成一较大规模的酸性水处理站。

一般矿山的酸性水用石灰乳中和处理达标排放,目前绝大部分硫铁矿选矿采用碱性流程浮选,这既可避免酸对设备的腐蚀,同时选矿废水为碱性水,与地下酸性水中和后达标排放。有的选矿工艺需要加硫酸,利用地下酸性水可省去部分硫酸的用量,降低选矿成本,又合理利用了部分酸性水,也是较为合理的方法,但要保证选矿的工艺指标。

7.6.4 硫铁矿烧渣的污染与治理

焙烧硫铁矿制酸过程中产生烧渣对环境的污染,一般每生产1t硫酸约产生0.7t烧渣。烧渣中含有残硫,排入水体则使水质酸化,腐蚀桥梁、船舶和影响鱼类生长。最近几年对烧渣的利用进行了大量的试验研究工作。但大多停留在小型试验阶段,大规模的综合利用还需要做深入细致的工作。应努力使烧渣含铁量达到炼铁、炼钢的要求,变害为宝,做到矿产资源的综合利用。

第8章 砂矿床开采

8.1 概述

人们印象中的海滩，是金黄的沙滩和惬意的浴场。可不是吗，在绵延万里的海岸线上，有些地方分布着低缓的泥质潮坪，人们在那里开辟盐田或者发展潮滩养殖；而在另一些地方则铺展金色的沙滩，人们在那里开辟海水浴场和游乐场所(图8-1)。可是，这金色的沙滩其实还有更重要的用途和价值，因为砂砾中蕴藏着很多重要的矿产——砂矿。

千万年来，由各种途径进入海洋的泥沙和尘埃中包含有各种不同的元素。不同成分的尘埃颗粒，比重不同，粒径大小不同，扁、圆形状也有差别。这些特征各异的矿物碎屑，在波浪、海流作用下，分别聚集沉积在一起，就形成了海滨砂矿床。

海滨砂矿最为大宗的是建筑用砂和砾石。这是因为它们是由常见的普通岩石碎屑生成的。较为稀少而价值甚高的海滨砂矿有：金红石、钻石、独居石、石榴石、钛铁砂、锆铁砂、钽铁砂、磁铁砂、铬铁砂、锡砂、磷钇砂、金沙、铂砂、琥珀砂、金刚砂、石英砂等等，真是琳琅满目，多不胜数。大海就像一个粉碎机和分选机，日夜不停地加工制造富含各种金属和非金属的细砂，并把它们按种类聚集在一起，形成可供人类开发利用的矿体。

图8-2为不同砂矿石在显微镜下的结构构造。



图8-1 海滨沙滩——砂矿



(a)显微镜下的钛铁矿砂



(b)显微镜下的锆石矿砂

图8-2 显微镜下的各种砂矿石

砂矿中含有的非金属、金属、稀有金属及贵金属具有重要的经济和工业应用价值。譬如：

石英砂的化学名称是二氧化硅(SiO_2)，属于非金属砂矿。石英砂是生产玻璃的重要原料。石英砂中的硅元素是半导体材料。钟表、精密仪器、电脑、火箭导航等自动化技术离不开硅。

从金红石中可以提炼钛。钛是制造火箭、卫星必需的贵金属。锆石中的锆、独居石中

的钎都是核反应堆运行不可缺少的金属材料。金刚砂中的金刚石是天然物质中最坚硬的材料,除可以划玻璃、钻瓷器外,制造各种钻头离不开金刚石。

金刚石就是钻石,是与黄金齐名的贵重矿物材料。说来令人难以置信,全世界天然金刚石产量的5/6来自海洋。南非是海洋金刚石的主要生产国,其次是俄罗斯。

澳大利亚是世界上最大的金红石和锆石开采国。美国白金(铂)产量的90%来自阿拉斯加海滨的砂矿。日本磁铁砂开采遍及列岛沿岸。泰国、印尼、马来西亚海滨锡矿砂开采是世界著名的。

黄金生产今后也有主要依赖海洋的趋势。1952年,美国在俄勒岗州太平洋海滨开采金砂和铂砂。目前,开采海滨金砂生产黄金的主要国家有美国、俄罗斯、菲律宾、加拿大等国。

8.2 中国砂矿资源与开发利用

8.2.1 中国砂矿资源

我国海岸带蕴藏着丰富的滨海砂床资源,主要分布于广东、广西、福建、台湾、海南和山东沿海,其中广东省砂矿类型最多,储量也最大。辽宁、江苏、浙江也有些砂矿,但规模较小。图8-3为我国海滨砂矿资源的分布示意图。我国辽东半岛沿岸砂矿中含有金、锆英石、钛铁矿和独居石等几十种;山东荣成沿岸砂矿含有以锆英石为主的多种原料;海南沿岸砂矿中含有钛铁矿、独居石、锆英石、铬尖晶石等;我国台湾省西南海岸砂矿中含有独居石、锆英石、钛铁矿等。

我国海洋地质工作者已发现了20多种滨海砂矿,其中形成可开采矿床的就有锆石、锡砂、独居石、钛铁矿、磷钇矿、铬铁矿、磁铁矿、铌钽铁矿、金红石、砂金、金刚石、石英砂等13种。目前,已找到各类砂矿191个,其中大型矿床35个,中型矿床51个,小型矿床105个,矿点135个。各类砂矿总地质储量 $164\ 137 \times 10^4 \text{ t}$,具良好的开发前景。现已探明储量:钛铁矿2 379万t、锆英石250万t、磁铁矿和71万t、独居石11万t、金红石7万t、磷钇石0.9万t、锡石0.8万t。

8.2.2 中国砂矿资源的开发利用

我国是世界上滨海砂床种类较多的国家之一,华北地区以富含砂金、金刚石等矿产为特色;华南地区则以有色、稀有、稀土矿物砂矿为主体。目前,开采量最大的砂矿为建筑用及工业用石英砂。随着国民经济建设的高速稳定发展,矿产资源的开发利用事业正蓬勃发展,

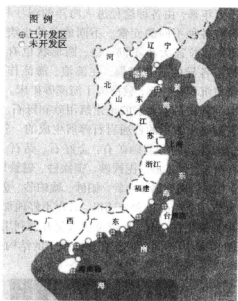


图8-3 我国海滨砂矿资源分布示意图

砂矿开采事业方兴未艾(图8-4)。因开采对环境的影响,以后调查开发应以30~50 m水深矿体为宜。

砂矿具有重要的用途和经济价值。下面列举的这些矿物,主要来自于砂矿,或者是部分来自砂矿、部分来自原生矿,基本上都是现代高科技工业的重要原料:

钛铁矿和金红石是提炼金属钛的原料。目前钢铁一直是人类大量使用的金属材料,但有人预言钛可能是取代钢铁地位的“后起之秀”。钛比铁更耐高温、更耐腐蚀且硬度更高,重量更轻,适用于制作化工装置和军事武器。

独居石可用于提炼金属钍。钍受到中子轰击后可以变成铀233。后者是核燃料,所以钍是制造核燃料的原料。

锆石可用于提炼金属锆。锆不但是一种耐高温、耐腐蚀的金属,而且还是一种良好的超导材料,制造微型电子计算机离不开它。它还可以代替铂用于制造坩锅,而价格仅是铂的1/7。锆还是一种“新生物”元素,用做人造骨骼时,肌肉可以附着其上顺利生长。

磷钇矿可以用来提炼钇,钇广泛应用于微波技术和激光技术中,还是彩色显像管上的荧光粉材料之一。

石榴子石是硬度仅次于金刚石的硅酸盐矿物,是重要的研磨材料。

我国虽然已探明大量砂矿,但仍然满足不了国民经济发展的需求。今后在加强海岸带砂矿勘探的同时,还要到大陆架浅海中去寻找古代滨岸砂矿。在距今25 000~15 000年以前的晚更新世时期,地球经历了冰河期,海平面下降,古海岸线在大陆架上一次次迁移,留下大片砂质沉积物,即所谓“残留砂”。勘探表明,残留砂中也含有大量砂矿。

除了一般的砂矿概念外,砂子、砂砾本身就是重要建筑材料。随着世界人口增加,建筑用砂量也迅速增加。英国、日本、美国、加拿大等国,早已大量开采海岸和大陆架的建筑用砂,采砂作业水深已达80多m。我国是一个发展中的大国,建筑用砂呈急剧增长态势。据专家分析,我国年建筑用砂需求量为26万亿t,若30%来自海洋,则年需海砂8亿t。据估计,我国大陆架砂体分布面积为32.2万km²,海砂储量可达1.6万亿t,为满足我国建筑用砂需求提供了良好的条件。不过需要指出,大量开采建筑用砂,可能破坏海岸环境,带来海水入侵、海岸侵蚀等严重后果,并与其他海洋产业发生矛盾,所以必须认真调查研究,做到科学合理地利用海砂资源。

当然,除了海滨和浅海蕴藏的丰富砂矿资源外,河滩砂矿资源也在整个砂矿资源中占有一定的比例。

8.3 砂矿床开采方法

目前,开采的主要砂矿矿床为河滩砂矿以及海滨或浅海海底砂矿,主要包括非金属砂矿、重矿物砂矿和贵重砂矿(表8-1)。



图8-4 大型采砂设备正在开采海滨砂石料

表 8-1 浅海海底主要砂矿

非金属砂矿	建筑用砂和砾石、石灰质砂和贝壳、硅质砂、次等宝石、磷钙土、霞石、海绿石
重矿物砂矿	磁铁矿、锡石、钛铁矿、铬铁矿、独居石、金红石、锆石
贵重砂矿	金刚石、铂、金

8.3.1 河滩砂矿开采方法

河滩砂矿一般用采砂船进行开采。采砂船一般由船体和移行、挖掘、洗选、排尾、动力、供水、信号等设备组成(图 8-5)。

采砂船的采选设备安装在平底船上,能在一定水位的采池中漂浮,平稳地生产。

开采优点是生产能力大、劳动生产率高、成本低、生产集中、便于管理。缺点是使用条件要求严格、初期设备费高。



图 8-5 作业中的采砂船

该方法适用于:①砂矿储量丰富,保证开采所必要的服务年限;②矿床底板平坦,无深坑和突起的基岩,不含大量大块砾石和黏土夹层;③水源充足,水深大于吃水深度,并为不断地排放污水,需及时向采池补充清水,一般为 50~250 L/s;④矿床宽度不小于采砂船的最小工作宽度;⑤矿床底板坡度适宜,通常应为 0.010~0.025。

不适于开采河流湍急和长年冻结的矿层。

用于河滩砂矿开采的采砂船可按移行方式或挖掘设备进行分类。

按移行方式分为:钢绳式、桩柱式、混合式;按挖掘深度分为:浅挖(<6 m)、中挖(6~18 m)、深挖(18~50 m)、超深挖(>50 m)。

按挖掘设备分为:①链斗式,在闭合斗链上装许多挖斗,用斗链的旋转和斗桥的往复摆动进行挖掘,使用最广泛。又分间断式和连续式两种。②单斗式,又分铲斗式和索斗式:前者在船上装一个较大的铲斗,为 2~10 m³,可挖掘较坚硬的砂矿,多用于海港建设;后者在船上安装 1~4 个抓斗,可在较窄的场所工作,适应变化较大的深度,多用于较深的海洋砂矿开采。③吸扬式,一种漂浮在水上的泵站,用来开采松散的海滨砂矿和露天矿剥离。又分绞吸式、耙吸式和斗轮吸扬式等。

河滩砂矿采砂船的开采工艺过程如图 8-6 所示。链斗自水下挖掘出的砂矿,经装矿漏斗送到洗矿圆筒筛中;筛下产品与水,经矿浆分配器,分配给各选矿设备;尾砂经尾砂槽排至采砂船后方,形成尾砂堆;筛上的大石块和泥团,经过砾石溜槽,用输送机排入船后的采空区,形成砾石堆。

提高斗链速度是提高采砂船生产能力的重要途径。影响斗链速度的因素,主要是岩矿的性质。黏性砂土的斗链速度要小些,以易于卸料;砂质松散土岩,斗链速度可稍大。一般为每分钟 16~24 斗。

河滩砂矿开采的开拓方法有基坑开拓法、筑坝开拓法和联合开拓法。

①基坑开拓法。沿矿体边界或在矿体附近,开掘安装采砂船的坑。基坑的尺寸由采砂船

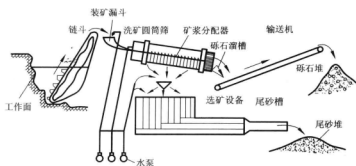


图 8-6 采砂船生产工艺示意图

的规格决定,深度由采砂船漂浮所需水深决定。此法用于开采河漫滩的砂矿。

②筑坝开拓法。修筑若干横穿河谷的永久性或临时性挡水坝,提高水池水位,使采砂船能进入比河漫滩还高的采区工作(图 8-7)。挡水坝的数目及其间距决定于所需水位上升高度和矿床纵向坡度,坡度愈陡,则坝数愈多。此法用于开采坡积砂矿,或采砂船不能正常漂浮的区段。

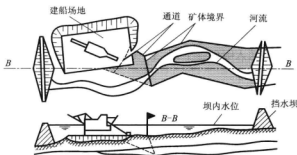


图 8-7 筑坝开拓法示意图

③联合开拓法。上述两种方法的联合运用。

河滩砂矿的采矿方法按工作面推进方向可分三种:

①横向采矿法。适用于倾斜不大而宽阔的砂矿床。采矿时沿矿体横向分成条带进行开采。本法又分为单工作面横向法和相邻工作面横向法。

②纵向采矿法。适用于窄而长的砂矿床。采矿时沿矿体纵向分成条带进行开采。又分单工作面纵向法和平行工作面纵向法。

③联合采矿法。矿体赋存条件较复杂时,可将上述方法联合使用。

8.3.2 海滨或浅海砂矿开采方法

对于海滨或浅海砂矿而言,目前开采规模较大的是建筑用砂和砾石、锡石、金刚石、铁砂和金矿砂等。主要的砂矿开采方法主要用链斗式、水力式、压气升液式和抓斗式采砂船开采,前两者较常用。

(1) 链斗采砂船开采

如图 8-8 所示,链斗采砂船的基本构成为采砂船、能连续挖掘并提升砂矿的采砂链斗以及构建在采砂船上的洗选设备。这种设备抗风浪性能差,通常用于开采水深小于 50 m 的砂矿。目前东南亚国家用它开采浅海锡砂。

(2) 水力采砂船开采

利用砂泵或水射流将海底砂矿以砂浆形式通过管道吸至采砂船的洗选设备中。水浅时砂泵装在船上；水深时砂泵置于水中或与水射流联合使用。胶结砂层用高压水射流器或装有旋转刀具的挖头预先松散。泵吸式水力采砂船的作业深度一般为 9~27 m；与水射流联合使用时作业深度可达 68 m。常用于开采建筑用砂和砾石(图 8-9)。

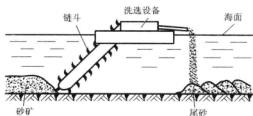


图 8-8 多链斗采砂船开采

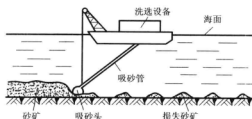


图 8-9 水力采砂船开采

(3) 压气升液采砂船开采

将压气送入吸砂管下部，使气泡与管内砂浆混合，降低砂浆比重，利用管内外压差举升砂浆(图 8-10)。

它不仅用于浅海，还可用于深海开采。对胶结砂层须预先松散。

(4) 抓斗采砂船开采

这种采砂船受海水深度影响小，灵活性高，可采海底不平的和粒度不均的砂矿，但生产能力低。也常用于海底取样(图 8-11)。

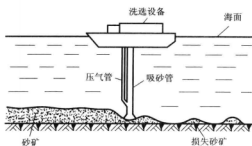


图 8-10 压气升液采砂船开采

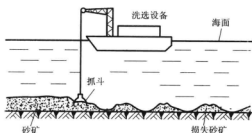


图 8-11 抓斗式采砂船开采

为了提高砂矿开采效率及砂矿回采率，近年开始用潜艇在海底取样捞砂，观察海底情况，并用无人推土机在海底集砂，以提高采砂船生产能力和回采率。

8.4 陆地砂矿露天水力开采

除了河滩、海滨或浅海砂矿床外，也存在一些陆地砂矿床。这类矿床多用水枪冲采砂矿，并用加压运输或自流运输的开采方法(图 8-12)。中国很久前即开始人工淘采砂矿，

1673 年曾用附近高山天然水源,开凿明沟,引水冲淘砂矿。1929 年在广西水岩坝砂锡矿用水枪砂泵开采,在望高砂锡矿用自然水压,装备水力提升器开采,节省了电源,经济效果良好。1949 年后,砂矿露天水力开采由开采砂锡、砂金发展到开采钨钛锰矿、铌钽铁矿、锆英石、金刚石等,甚至用水力开采黏土。使用水力开采的矿山、基建时间短、投资少、设备简单、生产率高、成本低、投资见效快、技术经济效果良好。



图 8-12 水枪冲采砂矿

8.4.1 砂矿露天水力开采的开拓方法

砂矿露天水力开采中的矿床开拓方法主要为基坑开拓法、堑沟开拓法和平硐溜井开拓法三种。

(1) 基坑开拓法

采场内开掘长为 40~50 m、宽 10 m 的基坑,坑内布置砂泵扬送。视矿体厚薄,基坑可一次或分段掘到矿床底板,坑内矿浆池深度一般为 1.5 m 左右。

(2) 堑沟开拓法

开掘堑沟,在沟内设输矿沟道,自流运输砂矿。如越过凹地,可与自流倒虹管配合,不用动力,经济可靠(图 8-13)。

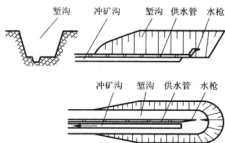


图 8-13 堑沟开拓法

(3) 平硐溜井开拓法

开掘平硐和溜井通向矿体。在溜井中安设溜浆管,平硐底板镶砌冲矿沟。本法适用于喀斯特山坡地区的低凹分散矿块,为节约动力,应尽量采用自流运输,避免砂泵扬送。目前使用的平硐长度已达 2.6 km。溜井分垂直和倾斜两种,前者应用较多。溜井用密集支柱支护。溜浆管的管径通常为 350 mm,矿浆通过该管送入平硐中的冲矿沟。冲矿沟布置方式有两种:①砌筑于平硐底板上,适用于服务年限短的矿山;②在平硐底板下面开掘。管道与冲矿沟的连结处设有缓冲池,以减少冲击力,防止矿浆从管内流出时飞溅。管道上部入口处应设格筛,以防大块和泥团阻塞管道。

8.4.2 砂矿露天水力开采的采矿工艺

砂矿露天水力开采中的采矿工艺主要是冲采,有时要进行残矿回收,在有些砂土中需预先松动和清理废石。冲采水枪的进水管直径为 150~200 mm,喷嘴直径常用 38~65 mm,压头为 50~150 m;耗水量为采砂量的 1.7~14 倍,在高山缺水地区,控制在 3 倍以下。水枪距工作面的最小距离,通常与阶段高度值相近。水枪移动步距为 4~6 m,砂泵移动步距为 50~200 m;或先将矿浆池前移,当砂泵吸入管加长至 50~90 m 后,再移动砂泵。

水力开采一般不适用于严寒地区。在气温低于 5°C 的地区,应有防寒措施,如对水泵、砂泵和水管等进行防冻;在水管较低点设放水闸门,工作停止时注意放水;设置备用水管;采用高阶段时,采取减少水量的措施,将水压提高 $50\% \sim 60\%$;采场底板坡度比夏季加大 $25\% \sim 30\%$ 等。

水力冲采法又分为逆向、侧向、顺向及联合冲采法,实际应用中,以逆向冲采法较多(图8-14)。该法系将水枪对准工作面,用射流在台阶底部掏槽,使砂土坍塌,与水混合成矿浆,逆向流往矿浆池和冲矿沟,可充分利用射流冲击力,减少耗水量。由于部分残矿不能回收,采场底板有裂隙或溶洞时,又有部分矿石沉积,矿石损失率一般为 $5\% \sim 10\%$ 。冲采时表土和夹层混入,使出矿品位降低;但同时有部分废石被筛出,又可使出矿品位相对提高,一般实际贫化率为 $5\% \sim 10\%$ 。

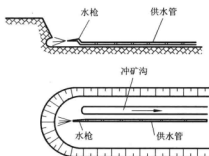


图8-14 逆向冲采法

(1) 砂矿的预松动

可提高水枪效率,降低水电消耗和采矿成本。松动方法有爆破法和水压法。前者使用较多,经济效果良好,在高山缺水地区更为显著,每吨砂矿的耗水量可降至 1.7 t 。后者适用于具有渗透性的砂矿,在距阶段坡顶线 $2 \sim 3\text{ m}$ 处插入一排钢管,插深约 2 m ,管距约 3 m ,压入高压水。经数小时可使土岩塌落,采一吨砂矿耗水 $0.5 \sim 0.7\text{ t}$ 。此法与底部掏槽相结合,效果良好。

(2) 残矿回收

有的残矿是由于工作面底板坡度而形成,有的则为残留于喀斯特溶洞中的砂矿。前者一般先用爆破法松动残矿,然后用水枪逆向冲采,再调整喷嘴直径,用顺向冲采法清扫底板残矿,并用小型移动砂泵扬送矿浆至主砂泵的矿浆池内或冲矿沟中;不能冲走的废石,可用人工或机械清理。后者可用胶管小水枪冲采,配合小型移动砂泵;如溶洞狭小,可用水力射流提升器回收。

8.4.3 砂矿露天水力开采的运输方法

砂矿露天水力开采时,砂矿的运输方式主要分为水力运输、自流运输、倒虹管运输和加压运输几种。

(1) 水力运输

分自流和加压两类,前者不耗费电力,生产成本低,又分沟道运输和管道运输两种方式。沟道运输可就地取材,基建投资少,中国广泛采用。在地形条件限制时,往往辅以自流管和倒虹管。

沟管线路选择应满足:①基建工程量小,架空部分少,施工方便,利于维修;②线路尽可能取直,线路转角不小于 120° ;③使大部分砂矿或剥离物能自流运输,少用辅助砂泵;④自流运输的沟道坡度大于砂矿流动的临界水力坡度,线路转角处最好有 100 mm 的落差;⑤沟道坡度过大时,用跌水落差调整,以减少磨损;⑥在地形有起伏时,可用自流管和倒虹管,在

最低处设排矿阀。

(2) 自流运输

自流运输中应充分考虑沟道断面、沟道坡度设计、衬砌材料选择和泥团处理等问题。

沟道断面有半圆形、矩形和梯形。后两种在生产中广泛被采用。矩形断面的开挖工程量小,流深较大,砌筑方便,但更换沟底板不方便,大泥团较多时易阻塞沟道,水力半径小。梯形断面与之相反。取二者之长,可以上半部为矩形,下半部为梯形。冲矿沟的深度应为矿浆流深的2倍以上。

沟道坡度指矿浆自流沟道的最小坡度,其大小与浆中的土岩粒度、矿浆浓度和衬砌材料有关,平均粒径愈大,要求的坡度也愈大。一般应比临界坡度大10%以上。当矿浆浓度为20%~30%时,冲矿沟最小坡度约4%~6%。

常用的衬砌材料有石灰岩、大理岩、花岗岩、耐磨铸铁和辉绿岩制品等。各种主要衬砌材料的优缺点和通过万吨矿石的实际材料磨损率见表8-2。

表8-2 材料磨损率

材料名称	磨损率(mm/10 ⁴ t)	优 点	缺 点
石灰岩(大理岩)	1.3~1.5	可就地取材,投资少	耐磨性差,维修量大,经营费高
花岗岩	0.3	可就地取材,投资少,耐磨性较好	材料加工困难
耐磨铸铁	0.35	耐磨性好	造价高
辉绿岩制品	0.06	耐磨性最好	性脆、易碎、安装较难

沟帮和沟底的磨损比约为1:3;距沟底5 cm以上的部位磨损很少。

冲矿沟内矿浆流动时,常有泥块粘裹石块而成的大量泥团,阻塞冲矿沟,造成事故;含泥率高的矿区尤甚,因此必须进行泥团处理。泥团呈球状,较坚韧,必须冲压打击,才能破碎。处理泥团的主要设施有六面条筛和电动圆筒筛。

(3) 倒虹管运输

通过宽阔较深的洼地,可用倒虹管自流输送砂矿。倒虹管由钢管与铸铁管组成;用辉绿岩铸石衬里的倒虹管,使用效果更好。用倒虹管时流量愈大,矿浆浓度愈大,所需的静压头就越高。为减少水力坡度,降低静力压头,必须合理选择管径。管径必须由大到小,逐渐减小,并用渐缩管相互连接。入口段矿浆的流速须大于1.4 m/s,扬送段流速不低于3 m/s,矿浆在管道中流速为临界流速的1.1倍。矿浆入口处设置间距25 mm的条筛,在谷底平缓段安装球形阀,以清洗和排放阻塞管道的干结矿石;矿浆入口处还应设清水池,以调节矿浆浓度和流量,并在突然停电时用来冲尽管内矿砂。条筛前的矿浆沟应设闸门和储矿池,以便控制和调节砂矿量。平缓段的弯管角度应大于120°~160°,以避免转弯处所形成的涡流区。

(4) 加压运输

地形条件不允许自流运输时,用砂泵加压水力运输。砂泵一般均采用吸入式。如果需要串联作业时,中间升压泵可采用注入式。但一般不采用并联作业。矿浆在管道内呈紊流状态。固体颗粒在矿浆中的运动状态相当复杂,有高流速状态、临界流速状态和低流速状态。

矿浆在管道内流速与矿浆浓度、管径、矿石粒度和管道阻力系数有关。临界流速状态最经济。正确选定流速数值,可降低电耗和生产成本,减小压头损失和管道磨损。为防止管道阻塞,最小流速应为最大粒径砾石自由沉降速度的1.5~2倍。

矿浆在管道内运动的压头损失,在清水运动压头损失的基础上,考虑到矿浆比重和附加能量的影响来确定。压头损失与流速关系极大:流速低于临界流速时,将有固体颗粒沉降于管道底部而增大阻力;流速过大时,由于管道内的摩擦,消耗能量,也增大压头损失。正确选择临界流速,才能保证压头损失最小。选择最有利的矿水比(单位时间内运出的干矿重量与耗水量之比),可降低水、电消耗和生产成本,提高砂泵与管道的运输能力。

砂浆管道磨损很大,选用管道要注意管壁的厚度,尤其要选择适宜于临界流速的管径以减小磨损。使用的钢管每季应翻转一次,每次转 60° ~ 120° ,以延长使用年限。如使用200mm的无缝钢管,管壁厚8mm时,通过35万~40万 m^3 的砂矿后即完全磨坏,不能再用。

8.4.4 砂矿露天水力开采的供水

水力开采需大量用水,供水方法有自流、机械加压和联合法。

为节约用水,采场用水主要取自选厂尾矿池(或水力排土场),将用过的水澄清回收,循环使用。

水源来水作为生产过程耗损水量的补充,仅占总用水量15%左右。旱季耗损多,占20%~25%,雨季只占5%~10%。

加压泵站的位置定在矿区中央的高地为宜,以便充分利用静水压头和缩短管道长度,减少压头损失。

泵站贮水池的容积,应能贮备4~5h的用水量。

8.5 砂矿床开采新方法研究

随着生产技术、设备水平的提高,各类砂矿(陆地砂矿、河滩砂矿、海滨及浅海砂矿等)的开采工艺和方法也在不断更新和完善。在砂矿床开采新方法的研究上,主要努力的方向可归纳为以下几方面:

①为了减少露天式开采砂矿对农业用播种、割草、放牧及森林用地和地下水水位等的严重影响,研究提出一些既能有效回采砂矿,又能充分保护生态环境不受破坏的新开采工艺和方法。

②在现有的技术和设备条件下,为了提高采砂速度和回采效率,对回采工艺与方法进行必要的改进。

③研制功能更大、适用性更强的新的采砂设备。

下面介绍由重庆大学学者提出的气举及振荡脉冲射流相结合的滨海砂矿开采法的一般原理。

虽然在我国沿海地区如海南岛、辽东半岛、山东半岛、广东等地具有丰富的海滨砂矿资源,但通过近几十年的开采,目前水面以上的砂矿资源已消耗殆尽,水面以下的砂矿开采就显得更加重要。水下浅层的砂矿可用链斗式采砂船或砂泵抽取的方式进行开采。但对深层(水下7m以下)砂矿而言,用这些方法开采就存在以下问题:

①从理论上讲只能开采水下7 m 以上的疏松矿物,而大量位于水下7 m 的高品位砂矿得不到有效开采,资源浪费严重;

②对滨海砂矿中存在的硬土层、黏土层无能为力,需借助爆破才能抽取;

③砂泵叶轮的磨损严重,短则几天多则两周就要更换叶轮;

④设备操作不便。

相反,气举(Airlift,也可称为气力提升泵)和自激振荡脉冲射流相结合的方法开采滨海砂矿,则具有以下一些优势:

①利用振荡脉冲射流能破碎IV~VI级土岩,能使开采与抽取同时进行;

②能开采水下几米至数百米处的

矿层;

③工作部件无旋转零件,磨损小;

④设备简单、工作可靠、能连续工作的优点。

气举及振荡脉冲射流相结合的滨海砂矿开采装置如图8-15所示。它由提升机构、垂直输送管、空气喷射器、射流破碎装置,送水管和输气管组成。提升机构的功用在于将气举机构按一定速度逐步放入水中或提出水面。送水管将离心泵输出的压力送入射流破碎器。空压机输出的压缩空气经气包进入空气喷射器。

(1) 气举矿砂的工作原理

当压缩空气经气包、送气管进入空气喷射器时,它就与与轴线成一定角度对称布置的数个喷嘴中高速流出;高速气流一方面与输送管中液体产生强烈的动量交换,在空气喷射器的下端(气举吸头)形成局部真空;另一方面则在管内生成了比水的密度轻的气-水-砂混合物。这样就将水底下疏松的砂矿源源不断地抽取出来。

(2) 振荡脉冲射流作为气举破碎器

一般而言,只有水下砂矿没有粘结或经过预先松散,气举装置才能顺利地吸取砂矿颗粒。但在实际操作过程中,水下砂矿床不是松散的,砂矿层中可能包含很坚硬的土岩层,如红色或白色黏土、碎石等,用传统的土岩松散方法即铰刀、斗轮松散器和普通水力松散器是无能为力的。现在一般都是采用水下爆破的方式。这种方法在实际使用中极不方便,也不安全,整体效率低。而采用振荡脉冲射流作为破碎器配合气举连续作业可以很好地克服以上缺点。

(3) 振荡脉冲射流作为破碎器的基本原理

当一股射流或剪切流向下游流动时,射流中一定频率范围内的涡量扰动得到放大。在剪切层中形成一连串离散涡环,当其到达碰撞壁并与之相互作用时,在碰撞区产生压力振荡波,该波以声速向上游传播,又诱发新的涡量脉动。若分离区与碰撞区的压力脉动相互为反相,就会形成涡量扰动一放大一新涡量脉动产生的循环过程。该过程不断重复,就会形成强

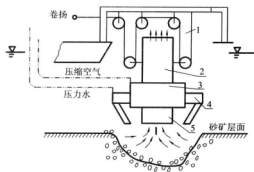


图8-15 现场试验用气举装置简图

1—提升机构；2—垂直输送管；

3—气体喷射器；4—射流破碎器；5—吸头

烈的自激振荡射流。室内和现场实验表明,水下土岩工作面在气举和振荡脉冲射流的共同作用下,逐渐形成了一漏斗状大坑。砂矿颗粒在脉冲射流冲击形成的振荡径向流动的作用下,向气举吸口移动。

现场实验表明,采用常规喷嘴的气举装置,在其抽取砂矿的过程中碰到硬土层时,其下降速度非常缓慢,排出的混合液几乎是清水。若换上振荡喷嘴,由于其优越的破碎能力,故能快速破碎土岩,使气举装置快速下降至深处抽取砂矿。

采用振荡脉冲喷嘴和普通喷嘴在相同条件下,抽取的砂水混合液的浓度分别为20%~45%和10%~15%,说明振荡脉冲射流既能有效破碎土岩,又能改善水下土岩表面的径向流场,使砂矿颗粒易于流动,增大抽吸浓度。

第9章 煤炭地下气化开采

9.1 概述

9.1.1 气化开采发展史简述

煤炭地下气化的概念,于1888年由伟大的化学家门捷列夫提出,1912年在英国进行了首次试验。1936年开始,前苏联进入工业试验阶段,至50年代,煤炭地下气化的工艺技术基本过关并投入工业生产,使苏联的此项技术在世界上处于领先地位。目前,受世界能源危机的影响,西欧各国(包括美国)也加强了对煤炭地下气化工艺技术的研究。1979年联合国“世界煤炭远景会议”明确指出,发展煤炭地下气化是世界煤炭开采的研究方向之一。煤炭地下气化能获得较好的经济效益、社会效益、环境效益。图9-1为煤炭地下生产系统示意图。

目前,俄罗斯正在筹建8~10座日产100万 m^3 以上的气化站。

美国地下气化试验始于1946年,试验获得了加大炉型、提高生产能力、降低成本、提高煤气热值等方面的成果,为煤炭地下气化技术走向工业化道路创造了条件。美国能源部宣称,一旦发生能源危机,美国将广泛使用该技术生产中热值煤气,以解决国家之急需。

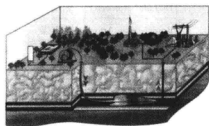


图9-1 煤炭地下生产系统示意图

德国拥有大量的煤炭储量,但其特点是埋藏深,且处于海底。其深层煤的储量高达1万亿t,延伸至北海的广大煤田深度大于5000m,用现行的采煤方法无法开采。因此,德国特别重视煤炭地下气化技术的研究。1979年,德国与比利时完成了一次深度达860m、煤层厚6m的试验,获得了良好效果。

英国、法国、捷克和西班牙等国也先后结合本国煤层赋存特点,对煤炭地下气化技术进行了研究。在中等深度(500~700m)煤层中进行的试验成功地采用了钻孔后退式供风调控方案,气化总时间达301h。

我国于20世纪50年代曾在大同胡家湾矿、蛟河煤矿、鹤岗兴山矿等10余处开展过煤层地下气化技术的试验。直至1984年,中国矿业大学又重新开始研究,并于同年在徐州马庄矿完成了煤炭地下气化现场试验;1994年在徐州新河二号井完成了半工业性试验;1996年在唐山刘庄煤矿完成了工业性试验,采用了有我国特色的“长通道、大断面、两阶段煤炭地下气化新工艺”,大大提高了煤气的热值,所建的地下煤气站已连续工作2年多,所产煤气用于烧锅炉和供煤气公司使用。目前,山西、山东、吉林、黑龙江、河南、甘肃等省有关矿务局和煤

矿都筹备开发这项新技术。

表 9-1 为部分国家进行煤炭地下气化开采的有关资料统计。

表 9-1 部分国家煤炭地下气化技术实施情况

国家	地点	煤的类型	深度/m	倾角/(°)	煤层厚度/m	工作年限	气化剂
前苏联	莫斯科近郊	褐煤	50		4	1947 ~ 1962	空气
	里希查	长烟煤		30 ~ 40	0.4 ~ 1.5	1948 ~ 1962	空气、氧气
	南阿宾斯克	次长烟煤		60 ~ 70	2 ~ 9	1955 ~ 1995	空气
	安格林	褐煤	120 ~ 25		3 ~ 20	1961 ~ 1999	空气
	沙特斯	褐煤	40		2	1965 ~ 1974	空气
美国	Hannd	次长烟煤	85		3	1973 ~ 1979	空气
	Hoe Creek	次长烟煤	85		9	1976 ~ 1979	空气、氧、水蒸气
	Pricetown	长烟煤	270		2	1979	空气
	Rawlins	次长烟煤		60	7	1979 ~ 1981	空气、氧、水蒸气
	Centralia	次长烟煤	75		11	1981 ~ 1983	空气、氧、水蒸气
	Rocky Mountain	次长烟煤	110		7	1987 ~ 1988	氧、水蒸气
法国	Djerada(Morocco)	无烟煤		70	1	1950 ~ 1955	空气
	Bruay - en - Artois	无烟煤	1 200		1.2	1981	空气
	Haute - Deule	无烟煤	880		2	1985 ~ 1986	空气
比利时	Bois - la - Dame	无烟煤		87	1	1948	空气
德国、比利时	Thulin(比利时)	无烟煤	860		6	1979 ~ 1987	空气、氧、水蒸气
西班牙		褐煤	500 ~ 700		2	1991 ~ 1998	空气、氧
中国	徐州新河煤矿	烟煤		急倾斜		1994	空气
	唐山刘庄煤矿	烟煤		55 ~ 60		1996 ~ 1999	空气、富氧、水蒸气

9.1.2 气化开采概念、优势和发展方向

简单地说,煤炭地下气化是一种不经实际的开采过程(地下或露天采矿),从煤炭获得能源的方法。煤炭地下气化是在地下气化炉的条件下进行的,该技术目前主要有两种类型。

一是巷道式地下气化炉技术。就是在开采或废弃的煤矿中,建地下气化炉,以人工掘进的方式在煤层中建立气化巷道,并在进气孔底部巷道筑一道密闭墙(促使定向燃烧煤层),然后便可将密闭墙前面的煤炭点燃气化。此种方式中的单套地下气化炉由气化通道进气孔、辅助孔和出气孔组成,气化通道在同一煤层内连通各孔,但由于受煤层地应力和温度制约,因此人工竖井部分深度有限。

二是钻井式地下气化炉技术。即采用常规的油气钻井技术,钻一口普通的长裸眼水平井,与另外的两口直井在同一煤层内连通。单套地下气化炉仍由气化通道、进气孔、辅助孔

和出气孔等组成。施工时,先将进气孔底部的气化穴中的煤炭点燃,鼓入气化剂,连续使煤炭气化,同时由辅助孔鼓入空气(氧气),气化通道内会形成氧化带、还原带和干馏干燥带。国外大多采取此种技术。我国辽河油田在2005年成功建成了我国首座钻井式地下气化炉。这种煤炭气化方式,很好地发挥了石油企业的钻井技术优势,免去了巷道式建地下气化炉的条件限制。但因钻井井径受限,制约了单套炉的气化规模,有待进行单套炉多进气孔、多气化通道、多出气孔、大井眼钻进和扩眼完井等技术攻关。

在煤炭地下气化的实际施工中,通常是将气化剂(氧气、水或两者的混合体等)注入并通过地下预热的煤层,将处于地下的煤炭进行有控制的燃烧,通过对煤的热作用及化学作用直接产生水煤气(含有甲烷、氢和 CO_2 的气体),是一种集建井、采煤、气化工艺为一体的多学科开发洁净能源与化工原料的新技术。其本质是只提取煤中含能组分,变物理采煤为化学采煤,因而具有安全性好、投资少、效率高、污染少等优点。

虽然煤炭地下气化不是一个新概念,但早期的大部分工作都是在较浅深度进行的,因为成本最低。煤炭地下气化潜在的优势是从深井中($> \pm 1\,000\text{ m}$)提取能源,这些深井煤炭如果用传统方法开采将很不经济。煤炭地下气化研究仍处于初期阶段,但随着越来越大的环境压力,这个领域已越来越受关注。

煤炭地下气化可以回收老矿井废弃的煤炭资源,也可以开采薄煤层、深部煤层和“三下”压煤,以及高硫、高灰、高瓦斯煤层等。地下气化过程燃烧的灰渣留在地下,大大减少了地表塌陷,煤气可以集中净化。该煤气可作为燃料用于民用、发电,也可以作为原料气合成天然气、甲醇、二甲醚、汽油、柴油等或用于提取纯氢。该技术综合性较强,能有效地利用资源和能源,符合节约型的产业发展原则,利于就近建立综合型的产业群。

图9-2为某煤炭地下气化开采企业地面生产设施一隅。

粗煤气净化过程中可获得焦油和硫产品、酸产品和苯产品,与传统的煤炭开采工业相比较,具有明显的经济效益优势。主要表现在以下几个方面:

①净化后的燃气可以就近进行燃气发电,或向产业群和就近的城市和农村集中供热,还可以利用余热发展就近农村的温室绿色农作物产业,改善产销调节。

②可提取的氢气和氧气,除用作汽化剂外,氢气还是大城市交通清洁能源,有很高的经济价值,市场前景广阔,同时它还是精细化工的重要原料产品。

③粗煤气净化过程中分离出来的氮气,可以制成液氮,在油气田钻井和增产措施中具有重要的用途,国内油气田开发中对液氮的需求量亦在不断增大。

④净化后的煤气是重要的化工原料,由此可制取甲醇,进而制取甲酯和聚甲醛等。此外,净化后的煤气可作为制取合成氨、二甲醚和合成石油的原料。

煤炭地下气化开采产业较为灵活,可大、可小,投资少、成本低、投资回收期短、投资利用率高。煤炭是21世纪的主要能源,煤炭地下气化技术被喻为煤炭工业的一场革命,是今后



图9-2 某煤炭地下气化开采企业地面生产设施一隅

煤炭利用的主要方向。而且煤炭地下气化开采的试验和生产都已充分证明,煤炭地下气化开采的产业综合性越强,开采的成本就明显下降,获取的综合效益就越大。

采用地面和井下相结合的煤层气抽采利用技术,不仅有效地保护了矿区生态环境,也促进了循环经济的发展。煤炭地下气化开采的新趋势在于加大炉型、提高生产能力、提高煤气热值,以1 000 m以下的深部煤层地下气化开采为重点,目标在于建立联合企业,走综合利用的循环经济新途径,实施规模化开采。

9.2 煤炭地下气化开采

9.2.1 煤炭地下气化开采基本原理

煤炭地下气化的原理及过程与地面煤气厂生产煤气的原理及过程完全相同,产品也相同,只不过前者属于化学采煤方法,是将埋在深处的煤在地下点燃,燃烧转变为可燃气体,直接输送到地面。煤炭地下气化原理如图9-3所示,从地面向煤层打进气钻孔和排气钻孔,设法将两孔连通,在连通的空腔中将煤点燃,形成气化通道,空气从进气孔压入,生成的煤气从排气孔抽出。煤炭地下气化过程中可燃气体的生产,是在气化通道中3个反应区(氧化区、还原区及干馏干燥区)里,通过对煤的热作用及化学作用而实现的。

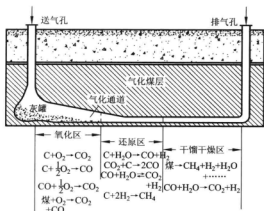


图9-3 煤炭地下气化原理示意图

(1)氧化区

这是气化通道初始一段长度,煤中的碳和氢与空气中的氧燃烧生成二氧化碳和水蒸气,产生大量的热,温度可达2 000℃,使煤层炽热与蓄热。

(2)还原区

气流继续向前流动,二氧化碳与水蒸气在灼热的煤层表面分别还原成一氧化碳和氢。其反应速度取决于还原区的温度,还原区的温度大约为1 200℃。

(3)干馏干燥区

当无氧的高温气流进入干馏干燥区时,热作用使煤中的挥发物析出,形成焦炉煤气。干馏干燥区的温度大约为800℃。

经过上述3个反应区后,就生成了主要组分是CO、H₂、CH₄的可燃气体,其温度为300~500℃。从排气孔输出的气体,经地表冷却、洗涤和脱硫等,变成可燃的气体直接经管道供煤气用户使用;所得动力气体可供涡轮机发电用;所得合成气体经化工厂再处理获得氢、甲醇、硫代硫酸钠等化工原料。

在具体施工中,可采用两阶段地下气化工艺,是一种循环供给空气和水蒸气的地下气化

方法。每次循环由2个阶段组成：第一阶段为鼓空气，燃烧蓄热，生产空气煤气；第二阶段为鼓水蒸气，主要发生分解反应，生产以 CO 、 H_2 为主的中高热值水煤气。由于分解反应是吸热反应，因此，炉内温度降低。当炉内温度降到一定的限度，又重新鼓入空气，如此循环。

煤炭地下气化技术的关键是实现煤炭就地燃烧并气化的过程，气化剂性质、气化通道压力、温度、流速等是影响和控制稳定燃烧的主要因素。加强对这些因素的调节与控制是确保地下气化技术成功的关键。

9.2.2 煤炭地下气化开采适用条件

煤炭地下气化要取得成功并获得最大的经济效益，必须对采区地质构造情况进行详细的勘探，因为并不是任何地质赋存条件下的煤矿资源都适合用气化开采技术进行开发利用。

在决定采用气化开采技术以前，要求确切搞清地下气化地区的地质构造、煤层赋存状况、产状、厚度、煤质情况以及水文地质情况。

假如煤田具有复杂的褶皱构造和破碎带，岩层又不稳定，则不宜进行地下气化。

被气化的煤层深度一般在300 m以内，超过500 m时难度就大些。

被气化煤层厚度0.7~22 m。

煤层倾角从 0° 至陡倾斜。

煤的种类从褐煤到烟煤，以透气性高的煤为好。

从水文地质条件看，被气化的区段内不应有含水层，气化煤层中的顶板中最好有一层能隔水防漏气的泥质保护层。

一个地下气化站要工作10余年以上，因此对煤的储量要求，除详勘时 $A_2 + B$ 级储量要超过50%外，具体数量则根据所设计的气化炉生产能力而定。计算时采用的经验系数为：1 kg 煤能气化成 $1.5 \sim 5.5 \text{ m}^3$ 的气体。

气体的热值取决于气化剂种类：当采用空气时，理论计算气体热值 4.4 MJ/m^3 (1050 kcal/m^3)；当采用富氧(含65%氧)时，气体热值可提高到 6.7 MJ/m^3 (1600 kcal/m^3)。所以地下气化时所得的是低热值气体。

9.2.3 煤炭地下气化开采的主要优点

作为一种新型的煤炭资源开发利用技术，其优点是不言而喻的。它不仅解决了一些不能用传统采煤方法进行开采的煤炭资源的开发利用问题，而且具有以下几方面的优点。

(1) 能提供丰富的洁净能源和化工原料

煤炭地下气化时能生成很洁净的气体，而把一切杂质和灰尘留在地下。此外，还能提供很多副产品，如氢、氨、碳酸、氨水、煤焦油、硫等，特别是提氢和制甲醇，有很好的开发前景和市场。

(2) 节约基建投资，缩短建设周期

地下气化站的厂房和设施比竖井生产简单得多，因此基建投资少。在同一矿区相同规模条件下，建地下气化站的基建投资约为建竖井的 $1/3$ 。假如利用报废矿井，原来矿区的所有基础设施均可加以利用，可节省很多基建投资；另外，利用报废矿井，对地下的地质结构比较清楚，还可节省大量勘探费用。

建一个地下气化炉仅需1~2年，而建一个竖井要3~5年甚至更长，缩短了建设周期。

(3) 可减少地表环境破坏和环境污染

据统计,截至1990年,全国因煤炭开采造成约3 000 km²(30万公顷)土地的塌陷,且每年新增坍塌地133~200 km²(1.33万~2.0万公顷);矸石积存达30亿t,占地120 km²(1.2万公顷),矸石自然排出大量烟尘及SO₂、CO₂、H₂S等有害气体,严重污染大气环境。而煤炭在地下气化,则消除了这些弊病。

(4) 避免了矿工繁重的体力劳动;生产安全,便于实现自动化和机械化

煤炭地下气化工作的操作和管理,全部集中在地表,不存在煤炭的采掘、堆放和运输,避免了井下矿工繁重的体力劳动,人身和机械事故大为减少;整个地下气化过程由仪表和计算机系统自动控制和管理。

9.3 煤炭地下气化的关键技术

煤炭地下气化分有井式和无井式两种方式,有井式是在井下采用人工掘进巷道方法来建立地下气化炉;无井式则是人不需要下井,而采用一定的贯通技术将气化通道贯通,从而形成地下气化炉。因此,对无井式地下气化,需要解决的关键技术主要有两方面:首先是在实体煤层中的点火工艺;其次是气化通道的开拓方法。煤炭地下气化技术虽然已经过了五六十年的研究和实践,积累了很丰富的经验,已经到了能应用和规模化工业生产的水平,但其存在的主要问题是保持地下气化炉能长期连续地稳定生产。影响连续稳定生产的因素很多,其中,某些关键技术目前还没有完全解决是一个主要原因。

(1) 地下气化炉结构和气化工艺参数的选择

应根据不同煤层赋存条件确定气化炉的结构和气化工艺参数。气化炉主要有无井式和有井式2类,各有利弊。无井式主要利用钻孔进行气化,完全免除了地下作业,气化过程比较稳定,容易控制,建炉周期短,可用于气化薄煤层、深部煤层、水下和建筑物下煤层、小煤矿边缘丢失的煤;其缺点是出气量小,钻孔多了影响生产成本。有井法即利用坑道进行气化,其优点是出气量大,还可利用原有坑道,节约了投资。但是密封井巷的工作比较困难,鼓风和煤气的漏损量大;气化区要远离采区;还需地下作业等。

气化工艺参数包括:气化剂种类,气体温度、流量和压力,吹气口的位置及调整等。其中,最后一项是至关重要的,因为它是影响稳定生产的关键,要通过地表实验室内模拟试验和生产过程中的实际测量而确定。

(2) 高温条件下煤和岩石物理化学性质的测试技术

煤炭地下气化能产生2 000℃的高温,它对煤和围岩的成分和性质如强度、渗透率、导电性、磁性等有很大的影响,必须通过实验研究,掌握其变化特点和规律,然后根据物探工作所提供的温度场分布特征,建立模型,进行光弹性实验,以获得燃空区应力场分布特征和燃空区的扩展规律,为地下气化工程的决策(例如气化炉的自动监控,进、出气钻孔的保护等)提供依据。

(3) 物探测试和监控技术

煤炭地下气化过程的动态监控技术中,比较难测试的是燃烧区内的温度和燃空区、燃烧区的界面。因此,一方面要加强对燃烧区界面电磁、声波特性的研究;另一方面要开发研制高分辨率监测仪器。受地下条件影响,采用热电偶测量地下温度时,电偶容易损坏,且只能测出2 m以内的温度情况,最好使用其他遥测手段。目前使用的主要有地面电位测量和高频

电磁波测量。至于燃烧区界面的测试,目前用得较多的是放射性测氦法,高分辨率的跨孔地震成像技术正在研究中。

(4) 大口径定向钻进(含贯通)及钻孔保护技术

无论是有井式还是无井式气化方案,都存在一系列钻孔问题。煤系地层一般比较松软,有时还比较复杂;气化深度一般200~300 m,但有时很深,甚至超过1 000 m;钻孔直径比较大,一般在150 mm以上,经常为300~500 mm。在这种条件下进行大口径定向斜孔钻进,有一定难度,也缺乏相应的定向钻进机具以及随钻测量系统。地下气化时,钻孔在地下要对接贯通,以往常用的贯通方法有水力法、火力法和电力法,这些方法耗时多、成本高,因此必须研制先进的定向贯通法。另外,地下气化时产生300~500℃的高温气体,而且含酸,这些气体要通过出气钻孔,出气钻孔的服务期限又比较长,一般3~5年甚至更长,因此,地下气化时存在着钻孔保护问题。还要研究耐酸、耐高温的套管,套管活动接头的结构以及高温气体的冷却和余热的回收等问题。

9.4 煤炭地下气化新工艺

煤炭地下气化在进行大规模工业化生产之前,都要进行必要的工业生产试验研究。传统的地下试验大多采用无井式地下气化炉,炉型小,一般口径小于180 mm,长度小于90 m,通道直径小,通风阻力大,鼓风压力高,电耗大,服务周期短,而且工艺单一,造成煤气热值低,产量低,成本高,稳定性差。为了克服以上缺点,有学者提出了长通道、大断面、两阶段、双火源、反向燃烧、多功能钻孔及压抽相结合等煤炭地下气化新工艺,并进行了相关试验。

模型试验及现场试验表明,长通道、大断面气化炉有以下优点:

- ①大型炉热效率高、产气量稳定、热值稳定。由于通道燃烧后,形成大而稳定的高温场,热惯性大,使得气化过程不易受随机因素的干扰;
- ②由于通道长,干馏煤气产量大、 CH_4 的含量高;
- ③由于断面大,产气量大,同时供风压力低,运行费用少。

传统的气化工艺,其气化炉的进、排气孔的功能是固定的,而气化炉氧化区、还原区及干馏干燥区的长度及其温度,时刻都在变化着,且固定单一功能的钻孔要实现对气化过程的有效控制是十分困难的。有鉴于此,长通道、大断面气化炉在进、排气孔之间布置了辅助孔,而且将进、排气孔、辅助孔与总进、排气管、供蒸气管连接起来,每一个钻孔又都设有注浆口,这样每一个钻孔都可以起到供风、供气、排气、注浆及点火的作用,构成多功能的用途。这样的地下气化新工艺,具有更高的可靠性、灵活性、互变性、可控性。

如图9-4所示,由进气孔鼓风,利用火源A生产空气煤气,当邻近孔下面煤层温度达到煤层燃点时,则由邻近孔鼓风,建立第二火源。这样第一阶段可由进气孔和邻近孔同时供风,建立双火源。火源A产生的 CO_2 在火源B还原,同时,火源A产生的可燃组分在火源B被烧掉,这样提高了火源B的温度。同时火源B的还原区温度也有所提高。这样,双火源和单火源所生产的空气煤气组分和热值差别不大。但第二阶段由进气孔鼓入水蒸气,水蒸气在火源A被分解,剩余的水蒸气在火源B继续分解,水蒸气分解率提高。同时由于气化通道里平均温度提高,所以干馏煤气产量也增加。因此,双火源两阶段气化,水煤气产量和热值较

之单火源气化都有提高。第二火源的位置,即两火源之间的距离,可根据需要,利用多功能钻孔,合理地改换供风位置来调节。

当正向气化时,火焰工作面将渐渐向出气孔移动,干馏干燥区越来越短,到后期还原区也将越来越短,最终还原区长度将不能满足氧化区生成的 CO_2 还原和水蒸气分解反应的需要,而使煤气热值降低。这时必须进行反向供风,由出气孔鼓风,进气孔排气,使火焰工作面向进气孔方向移动,重新形成新的气化条件。煤层反向燃烧试验结果表明:

①反向燃烧初期,因干馏煤气相对较多,所以煤气热值较高,但随着时间的延长,煤气热值随干馏气的减少而逐渐下降,并趋于稳定,而高于正向燃烧的情况;

②由于火焰工作面在烧过的煤或半焦煤层中移动,在新的煤面尚未因冒落而暴露足够多的条件下,燃烧强度越来越受到影响,因此,三次反向燃烧,煤气热值呈现渐次下降的趋势。

由还原区的2个主要反应可知, CO_2 还原和 $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$ 的分解都是体积增大的反应,因此,降低还原区的压力能够提高其反应速度,但是氧化区压力不宜降低,因为氧化区压力越高,向煤层里渗透燃烧的能力则越强。为了能同时满足氧化区和还原区的要求,可以采用压抽相结合的气化方案,由进气孔鼓风(氧化区一侧),出气孔用引风机向外抽风,调节鼓风压力和抽气压力,使还原区处于相对较低的压力条件下,这样也同时降低了干馏干燥区的压力,有利于干馏煤气及时排放。尤其是在气化通道因顶板冒落而出现局部堵塞情况下,采取压抽相结合,效果更明显。压抽结合气化可以减少煤气漏失,能够确保矿井安全。

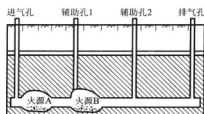


图9-4 双火源气化示意图

9.5 煤炭地下气化与环境保护

不管来源如何,能源的供给将产生经济和环境的影响。多年来,化石燃料被认为是“不清洁”能源,譬如,在许多煤层中存在的硫和有机氮,在产品气体中以 H_2S 和 NO_x 形式出现,还可能产生大量的二氧化碳(CO_2)、二氧化硫(SO_2)和颗粒物等,从而对环境造成影响。当然,不同类型的煤,其物理和化学特性差别很大,从而导致所产生的污染气体和颗粒物具有不同的性能。

最近几十年来,主要为了解决环境问题,许多新技术已开发出来,这些技术在提高与煤相关工艺的效率上具有巨大的潜力,且降低相关污染物排放。

由于在高压中进行地下气化,可利用已有技术在地面分离这些物质,以减少对环境的影响。产品气体中的 CO_2 比传统方法产生的量少,同时可利用高压条件把分离出来的 CO_2 经转化再注入气化炉腔中,以减少 CO_2 的释放量。地下气化过程中气体可从地层裂隙中散失,受污染的水也可进入周围地层。分析试样表明,地下气化的污染物主要是苯酚、一小部分 NH_3 和硫,这些物质均可提高水中生化反应对氧气的要求,改变水的pH。在存在地下水条件下进行地下气化,正确地选择气化压力可以减少地下水的污染以及气体的损失,当然能减少地下气化对环境的影响,同时能保证气化反应的有效性。

煤炭地下气化的环境效益是十分显著的。在中国,据统计因采煤引起的地表塌陷面积约

为30万公顷,且每年还要新增约2万公顷。全国煤炭生产已累计产生煤矸石39亿t,每年还要新增1.3亿t,煤矸石自燃会散发出大量烟尘及有害气体。煤炭地下气化将彻底解决传统煤炭开发造成的废气、废水、废渣污染,并使煤炭利用产业链的后续污染在源头得到解决。同时由于煤炭气化后废渣会留在原地,也可大大减少地面下沉,辅以充填措施后,可保证地面建筑不受影响。此外,煤炭地下气化技术也将使难以开采或价值较低的劣质矿床得到开发,并带动相应的煤化工产业发展,大大延长老旧煤矿的生产寿命。

9.6 煤炭地下气化开采具体应用

随着煤炭地下气化开采技术的日臻完善,今天,该技术已成为煤炭资源开发利用的主要途径之一。

山东里能集团独家负责建设及经营管理新河煤炭地下气化发电工程。该项目总装机容量198万kW,总投资80亿元。一期装机容量 2×33 万kW,投资33亿元。配套的煤炭地下气化工程初期气化区4台气化炉,单炉产气 $30 \text{万 m}^3/\text{d}$,总能力 $120 \text{万 m}^3/\text{d}$;二期产气量达到 $300 \text{万 m}^3/\text{d}$,初期掺烧比例占20%,二期逐步达到40%。一期工程达产后可实现销售收入11亿元,实现利税1.8亿元。

山东新汶矿业集团已成功建成煤炭地下气化产业化工程,标志着煤炭地下气化技术的产业化开发应用得以实现。这一技术的普及将有力推动我国煤炭资源的深度开发与清洁利用。山东新汶矿业集团煤炭地下气化项目采用“有井式、长通道、大断面、两阶段”气化和U形双炉并联运转方式,变常规物理采煤为化学采煤,将地面气化炉搬到井下,使建井、采煤、气化三大工艺合而为一。从1999年开始,孙村煤矿利用储量45万t的废弃矿床进行实验开发,目前日产煤气4万 m^3 ,已开始为1万户居民家庭和部分工业锅炉供气。

此外,煤炭地下气化技术也已成为挖掘剩余煤炭资源的新途径。

据统计,1953—1989年我国有报废矿井297处,1990—2020年有244处报废,报废资源量到2002年底已超过300亿t,一般为井工开采(由工人下入井内进行资源开采,与露天开采相对应,井工可采煤炭量仅占煤炭资源储量的11.43%)遗留的煤柱、薄煤层、劣质煤层、高瓦斯煤层等,丰富的深层煤炭资源和浅海地区的煤炭资源也未被开发利用。煤炭地下气化技术的发展应用,为这些资源的有效利用提供了途径。目前山东、山西、内蒙古、贵州等地都在引入煤炭地下气化技术,以使剩余的煤炭资源得到充分利用。

中国的石油企业近年来纷纷涉足煤炭开采综合利用领域。中国石油辽河油田率先进行了深层煤炭气化开采,于2005年启动项目建设,首套地下气化炉日前点火,开始试采煤气。有关专家表示,辽河油田的探索尝试,将带动更多的石油企业参与到煤炭地下气化开采项目中来。该技术未来发展的重点,主要集中在加大炉型、提高生产能力、提高煤气热值等方面,以便适应1000m以下的深部煤层地下气化开采需要,逐步实现煤炭等矿产资源的循环经济开发。

第 10 章 地热资源开发利用

10.1 地热的定义、形成机理及分类

“地热”是地热资源的简称，常指能够经济地为人类所利用的地球内部的热资源。地球内部蕴藏有由放射性物质衰变作用等原因所产生的巨大的热，有人称之为“大热库”，时时刻刻通过地球表面散发到大气中。据估计地球内部的热每年散发到大气中的热量达 1.089×10^{21} J，大大超过火山和地震活动所释放出的总热量。然而，热量总量虽大，但因分散，能够直接利用的地区有限。只有在地球内热相对富集地区如近代火山活动、构造活动强烈地区并达到为人类能够开发利用程度的这种地热，才构成可利用的地热资源。图 10-1 为新西兰某地热资源。

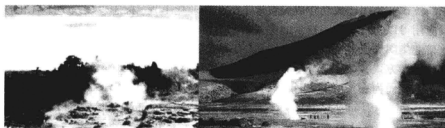


图 10-1 地热资源

地热的形成机理可简单地解析为：地球开始形成的时候曾经是一个炽热的行星，在漫长的地质年代里，地球表面逐渐冷却，但内部仍保存了大量的热能。同时，地球内部放射性元素在不断地蜕变，这种化学反应也在不断释放热量。由于地幔和地壳的热传导速度比较慢，地壳以下的温度逐步上升，越接近地核温度越高。在大多数地区，每下降 100 m 温度要上升 $2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ 。表面上看这个数字不大，但是，俗话说聚沙成塔，如果考虑到地球的表面积和半径的数值，地下热能就是一个十分可观的能量来源。据估计，仅仅地面以下 3 km 范围内的地热资源就相当于 3 万亿 t 煤提供的热量，差不多等于全世界煤炭年开采量的 1 000 倍。

广义地说，地热资源应包括以下三种：

- ① 地热过程的全部产物，主要指天然蒸汽、热水和热卤水等；
- ② 由人工引入地热储的水、气或其他流体所产生的二次蒸汽和其他气体、热水、热卤水等；
- ③ 由上述产物带出的副产品（指价值比较高的矿物质）。

地热资源类型划分有多种方法，根据地热系统的地质环境和热量的传递方式分成对流型地热系统和传导型地热系统两大类。依据地热资源的存在形式分为水热型地热资源和干热岩

型地热资源,前者是以蒸汽和液态水为主的地热资源,后者是以热岩(干热岩及岩浆)为主的地热资源。“水热型”地热资源是目前国内外地热开发的重点;“干热型”地热资源的开发利用尚不普遍。

10.2 地热资源的基本特点

地热是一种清洁能源,不过,高温高压热水夹着大量蒸汽冲出地面有可能造成噪声污染,而且有时地下热水中也含有一些有害物质。因此,地热的开发应当仔细选择地点,以避免和减少可能的污染。

作为能源矿产,地热有几个显著的特点:

①作为能源利用的同时,还可以作为水资源予以利用。尤其是那些不含有害组分、矿化度低的地热水,作为地热能利用后,绝大多数都可作为水资源加以利用,是淡水资源的必要补充。

②可开采利用地热能的大小,应用范围,取决于地热水温度及可开采水量。地热水温度因所处地质条件不同而有很大差别,对处于同一部位的传导型地热田,地热水温度随热储层埋藏深度增温。地热资源按温度分为高温、中温、低温三级,温度不同其应用范围也有所不同。

③地热水中含有多种有益的矿物组分,具有广泛的用途。地热水是一个大的溶剂,尤其是在热储中滞留时间长、温度高的地热水,溶于其中的矿物质很多,地壳中被发现的所有元素在地热水中几乎都可以找到,有的地热水中矿物质含量可达 100 g/L 以上。一般说来,温度较低的地热水,矿物质绝对含量较少,但其中某些有益于人体的微量元素含量可达到饮用矿泉水标准,可作为饮用天然矿泉水开发利用;温度较高的地热水,矿物质含量都较高,可含多种达到医疗矿水标准的物质组分,一般可作为医疗矿水开发利用;有的地热水中的某一种或几种矿物质含量达到工业开发利用的程度而可作为工业矿床开发利用。

④地热水中也不同程度地含有一些有害组分,开发利用会给当地环境造成一定的危害和影响,尤其是开发利用矿化度高的地热水,其废热水排放会对附近水体造成一定的污染。有的地热水中氟含量较高,超过生活饮用水标准而不能直接用于饮用,就地排放,对附近水体也形成一定的污染;有的地热水碳酸盐含量高,或二氧化硅含量高,开发利用时,温度降低会产生过饱和和沉淀而形成结垢,影响设备的使用寿命;有的地热水中硫化氢含量高,尤其是油田区的地热水,对设备具有较强的腐蚀作用;还有的地热水中含有一定的有毒、有害气体,排放也会给环境造成污染。

10.3 地热的基本用途

地热资源有着广泛的用途,它和矿物燃料的区别在于不用燃烧,因其可输送性比较低,输送高温地热水的极限距离约 100 km,天然蒸汽的输送距离大约只有 10 km,故一般是使地热能就地转换为电能或直接利用。比如,用于发电、工业烘干及制冷空调、供暖、医疗洗浴、水产养殖、农业温室栽培、灌溉等,而且应用范围日广。其中,“水热型”地热资源的开发是通过开发地热水(或地热流体)来实现的,既可利用其能量,又可利用其水量,有着其他能源矿产不可替代的作用,对其开发利用已日益引起人们普遍的关注。作为替代能源具有清洁、无污染及经济效益好的特点。

不久前,美国科学家还在新墨西哥州的洛斯·阿拉莫斯国家实验室,研制成功世界上最大的人工“地热井”发电装置。他们先打一口4 000 m深的井,利用水的压力使地下岩层断裂并形成1亿多 m^3 的地下水库,水库中的水被地下热岩层加热后再抽回地面,每分钟可以得到1 m^3 以上接近200℃的热水,用来发电可满足一个有4 000居民的城镇的全部用电需要。因为全球各地同一深度岩层的温度差不多,这个装置可以在任何地方使用。

一般来说,地热的应用范围取决于地热水的温度高低。温度高,可用于地热发电,温度低,则只能用于地热温室、养殖及农业灌溉。

①高温地热田(温度高于150℃)才可以用于发电。

②60~150℃的中、低温地热水,主要用于烘干、纺织印染及制革洗涤等方面。

③用于供暖的地热水温度一般在60℃以上,也有采用50~60℃的,50℃以下的则很少采用。分直接供暖和间接供暖两种方式:直接供暖是将地热水直接送入供热系统,其对地热水的水质要求高,不得对供暖管道系统产生腐蚀和结垢,一般为矿化度比较低的地热水;间接供暖是使地热水通过热交换器将热转换给供热系统进行供暖。开采具有腐蚀性和易产生结垢的地热水供暖,一般采用间接供暖方式。地热水供暖的利用率取决于地热水的温度及其供暖后排放水温度,地热水温度愈高,供暖后的排水温度愈低,则其供暖的利用率越高。

④最适于洗浴的地热水温度是40~60℃,温度偏高需加入凉水或适当降低温度后,方可用于洗浴,这样做对地热资源是一种浪费;温度偏低,会使身体感到不适。用于医疗的地热水,除有温度要求外,对水质有相应的要求,并制定了相关标准,如“医疗矿泉水水质标准”。

⑤不少低温地热水,因其来源于深部,未受人为污染,并含有一些有益于人体健康的微量元素,可作为饮用天然矿泉水开发利用。当然,作为饮用天然矿泉水开发的低温地热水,对地热水的污染物指标、微生物指标及锂、锶、锌、铜、铬、钡等组分的限量指标有严格要求,必须达到相关规定和标准。

⑥温度在30~45℃,符合TJ35渔业水质标准低矿化的地热水,可用于水产养殖。我国目前较多的用于养殖鳗鱼、罗非鱼、对虾、河蟹、甲鱼等。

⑦地热在农业方面的应用,一是利用地热建立温室,种植名贵花卉、蔬菜等作物;二是用于农田灌溉或给土壤加温。前者利用地热水温度在30~75℃之间,后者利用地热水温度一般在40℃以下。用于农田灌溉的地热水水质应满足农田灌溉用水水质标准。

10.4 中国地热资源简介

中国的地质构造条件,决定了中国的地热资源主要以两种形式存在:一是在构造隆起区(浅山区),沿主要断裂构造出露并受其控制的地热温泉;二是赋存于中、新生代沉积盆地中的地下热水。前者主要以热泉的形式直接出露地表,可开发的地段限于在地表有地热显示及其相关构造分布的地区,其分布受地质构造的控制,地热资源靠循环于断裂带中的地热水所提供,称对流型地热田;后者埋藏于地下深处的各热储层中,地热靠地球内部的传导热提供,通过开采热储层中的地热水得以利用,这类热田称传导型地热田。

中国地热资源是比较丰富的,据粗略计算,主要沉积盆地小于2 000 m的深度中储存的地热资源总量约 4.0184×10^{10} kJ,相当于 1.3711×10^{12} t标准煤的发热量,以其1%作为可开采量计算,可开采地热资源总量为 4.0184×10^{17} kJ,约相当于 1.3711×10^{10} t标准煤的发热量。

因中国山地多,全国平均单位面积热储量将小于沉积盆地单位面积平均热储量,全国960万 km^2 地热资源总量若以沉积盆地单位面积平均热储量 $4.415 \times 10^{13} \text{ kJ}$ 的50%估算,估计约 $2.11920000 \times 10^{20} \text{ kJ}$ 或相当于 $7.2310 \times 10^{12} \text{ t}$ 标准煤的发热量。可开采热量仍以热储量的1%计算,则全国地热资源可开采量约相当于 $7.23 \times 10^{10} \text{ t}$ 标准煤。

据1996年统计,全国已勘察的地热点(田)有738处,其中进行过勘探的有43处;详查的83处;普查及区域调查的612处。探明各级可开采地热水总量为247.016万 m^3/d ,可利用热能约4318.96 MW,每年所提供的热量约相当于 $4.644 \times 10^6 \text{ t}$ 标准煤。

地质调查发现我国地热异常3200多处,其中进行地热勘查的并已对地热资源进行评价的地热田有50多处。全国已打成地热井2000多眼。已发现高温地热系统255处,经过评估总发电潜力5800 MW·30a,主要分布在西藏南部和云南、四川的西部。在西藏羊八井地热田ZK4002孔,孔深2006 m,已探获329.8℃的高温地热流体。发现中低温地热系统2900多处,据调查,总计天然放热量约为 $1.04 \times 10^{14} \text{ kJ/a}$,相当于每年360万t标准煤当量。主要分布在东南沿海诸省区和内陆盆地,如松辽盆地、华北盆地、江汉盆地、渭河盆地以及众多山间盆地。这些地区1000~3000 m深的地热井,可获80~100℃的地热水。

相关研究结果指出,中国地热资源开发利用有以下特点:

- ①地热资源分布面广;
- ②以中、低温地热资源为主;
- ③地热田规模以中、小型为主;
- ④地热水水质以低矿化水为主,适合多种用途;
- ⑤开发利用较经济的是构造隆起区已出露的中、小型地热田;
- ⑥开发潜力大的是大型沉积盆地地热田。

10.5 中国地热资源开发利用情况

中国地热开发利用,随着社会经济和生态环境建设的需求,十年来,每年以12%的速度增长,到1998年底,地热采暖面积已近800万 m^2 ,地热温室面积70万 m^2 ,地热养殖300万 m^2 ,洗浴和温泉疗养1600多处,地热直接利用规模已逾500万 t/a 标准煤当量。

我国在地热开发利用的科学研究领域已取得了如下一些主要成果:

- ①建立了一套比较系统的地热资源勘查、地热利用技术和评价方法。
- ②开发了地热井的定向钻井技术,高温地热井的井控技术,大于250℃高温泥浆配方、测试与操作规程等等。
- ③开展了地热田回灌技术研究,对建立热储工程学和优化地热开发,保护地热资源与环境有着重要意义。
- ④开展井下换热技术研究,耐温潜水电泵(80~120℃)技术研究,各种型号耐温潜水泵已批量生产。

为了更好、更科学地开发利用我国的地热资源,还必须开展或加强如下的一些方面的工作:

- ①加强地热理论与应用技术研究,以市场为导向,积极推进地热产业化。
- ②高温地热发电必须与当地水电开发、生态环境保护有机结合起来,实施联合调度、多

能互补,充分发挥各自能种的优势,实现良性循环,可持续发展。

③加强已开发地热田的监测工作,优化地热田开发,加强热储工程研究和环境工程研究。

④加强地热装备的配套生产,实现系列化、标准化。

⑤完善地热生产运营和科学服务管理体系,杜绝非法开采,避免浪费地热资源,确保地热产业稳定和持续发展。

地热可作为清洁能源来利用,但开发地热不当也会引发灾难。因此,在开发利用地热资源的同时,还必须注意环境的安全。避免过量开采造成的地表塌陷、滑坡等工程地质灾害的发生;加强对高矿化度或含有害成分超标的地热废水排放的监控,避免对当地浅层水形成的污染;防止因地热开采造成的地震灾害。虽然通常人们认为,地震是由于地球板块的运动引起的,但发生在巴塞尔的一系列轻量级地震表明,人为的原因也能导致地震。

2006年12月,巴塞尔的一个地热开采钻井钻至地表5 000多m岩石深处,并通过灌水加压提取地热时,突然发生了地震。在随后的几天里持续发生的里氏3.4级地震,虽然没有造成房屋倒塌和人员损伤,但当地居民对地热能的信任已被彻底动摇,造成了当地居民的恐慌。

为了降低因开发地热引发地震的可能性,专家建议在开采地热时,以较多的浅井取代4 000 m以上的深井。

此外,在地热资源开发初期,由于人们认识不够,开采手段不完善,一般未能制定科学合理的开发方案,致使地热田过量开采,热储水位下降迅速,地热资源严重浪费。为有效控制水位下降,保护地热资源,在先进国家如美国、新西兰、冰岛已研究出一系列新的地热开发利用方法,其中回灌开采已成为地热开发管理中最重要的手段之一,并得到广泛应用,获得良好效果(图10-2)。

回灌是指从热储层中开采出来的地热水经过循环利用后被注回到热储层中,它是开采的逆过程。许多事实证明回灌不仅可以维持热储压力而且可以通过低温水被热储层加热而汲取更多的热能。地热回灌按照回灌井和开采井所处热储层位的异同,可以分为同层回灌和异层回灌,按照回灌模式有:同层对井回灌、异层对井回灌与同层两采一灌。选择回灌类型的原则是能进行同层回灌的则进行同层回灌,在无条件的同层回灌时,则进行异层回灌。因为异层回灌时,回灌水流经不同类型的热储层会使水质发生改变,可能造成水源污染。

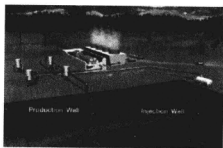


图10-2 地热水开采与回灌示意图

Production well—生产井 Injection well—回灌井

10.6 地热资源开发利用条件

并非所有的地热都能被开发利用,由于受当前科学技术水平、设备能力、开采方法和工艺等限制,地热资源最终能否被开发利用必须综合考虑热储层埋藏深度、地热水温度、水量、水质等影响因素。一般说来,符合开发利用条件的地热资源满足下述条件:

(1) 合适的热储层埋藏深度

在目前开采技术经济条件下,对于地热资源的开发,主要限于热储层埋深在2 000 m以内的深度内,但随着技术经济的发展,在一些大型沉积盆地区的地热资源开发深度已达到2 500 m以上。

(2) 恰当的地热水温度

开发用于供暖和医疗洗浴或作为医疗洗浴用水的地热资源,一般不应低于35℃;作为供暖用水,则不得低于60℃,低于此温度,开发将是不经济的。

(3) 地热水水量

取决于热储层的渗透率和成井的单井出水量。规定热储层的渗透率不少于 $0.05\mu\text{m}^2$,单井出水量不少于 $300\text{ m}^3/\text{d}$ 。

(4) 地热水水质

对地热水水质要求因用途不同而异,目前大量用于供暖、医疗、洗浴的地热水,主要是矿化度小于 3.0 g/L 的低矿化水,少数医疗洗浴用水采用 $3.0\sim 5.0\text{ g/L}$,高于 5.0 g/L 以上的地热水,因其废水排放有环境污染问题,而很少开发利用或只是少量的间接利用。

在开发利用地热资源的同时,也应加强对地热资源本身及周边环境的保护工作。主要应对措施如下:

①结合热储层的埋藏深度及当前的开采技术经济水平严格控制开采深度。

②实行边探边采或滚动式勘查开发。由于地热资源的开发是通过勘探打井直接取地热水实现的,不论是地热勘探孔还是地热水源井一经打成,就可用于地热水的开发,因此地热资源开发并不需要等到勘探工作结束后。

③加强动态监测。地热资源是在特定地质条件和一定的地质历史时期里形成的,其补给来源受到特定地质构造条件的限制,补给量有限,有的基本没有补给,在一定意义上讲是不可再生的资源,开发一点,就消耗一点,开发得多,消耗得多,这一变化都将在地热水的动态变化中显现出来。

④地热回灌是提高地热资源利用率的必要手段。多数情况下,地热的开发利用是靠降低水位,消耗已有的储存量来实现的。为提高地热资源的利用率,可通过对热储层进行人工回灌来实现。

⑤地热开发必须同时重视环境保护。

10.7 地热能利用技术的基本原理

10.7.1 常用地热能利用技术

地热能开发利用技术,前面已经提及。事实上,常见的地热能开发利用技术可分为三种,即:

①地热能发电 地热能发电技术是指用于将热水流转换成电能的技术。使用的转换类型取决于热流的形式(蒸汽或水)及其温度。

②地热的直接使用 低温至中温地热水源($20\sim 150^\circ\text{C}$)可直接为民宅、厂房及商场供热。这一档次的地热能在美国分布广,其应用范围涉及家庭和办公场所的取暖、商用阳光房、养

鱼场、食品加工厂、金矿生产及其他许多领域。

③地热取暖或制冷 地热取暖或制冷(地热泵)技术是一种高效的能源再生技术,已经在商、住建筑中得到广泛应用。该技术可用于取暖、降温及水加热,其最大的优点是将自然环境中存在的热资源集中起来加以利用,而不是燃烧燃料来获取热能。

10.7.2 常用地热能利用技术的基本原理

10.7.2.1 地热发电基本原理

地热发电是地热能开发利用的主要途径(图10-3)。能用于将地热流转换成电能的技术有三种,分别是干蒸汽发电技术、瞬间气化发电技术和双循环发电技术。具体使用哪种技术取决于地热流的状态(蒸汽或水)及其温度。

(1)干蒸汽发电系统

是用得最早的地热发电技术(图10-4)。该技术利用来自钻孔的地热源的蒸汽流,直接将它导入涡轮机/发电机进行发电。



图 10-3 位于加利福尼亚大峡谷的地热发电站



图 10-4 位于加利福尼亚间歇泉的干蒸汽发电站

蒸汽发电站使用的地热流主要为蒸汽。蒸汽直接进入涡轮机,涡轮机驱动发电机发电(图10-5)。蒸汽取代了燃烧燃料来驱动涡轮机(同时也取消了燃料运输和储存环节)。这是最老式的地热发电站。该技术最先于1904年在意大利的Lardarello得到使用,至今依旧很有用。今天,位于北加州间歇泉的世界最大的纯地热能发电站使用的就是蒸汽发电技术。这些工厂只排放多余蒸汽以及少量气体。

(2)瞬间气化发电技术

是目前用得最为普及的地热发电技术。该技术的关键是将超过 182°C 的高压地热水泵送到设在地面的发电机中进行发电。

温度超过 182°C 的地热流能够用来进行瞬间气化发电。基本原理是,将地热流喷入一个压力比地热流本身低得多的汽化罐中,导致部分流体迅速气化或瞬间气化。形成的蒸汽驱动

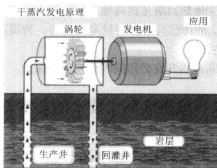


图 10-5 干蒸汽发电原理

涡轮运转, 涡轮带动发电机发电(图 10-6)。如果汽化罐中有多余的地热流, 则可以考虑用次级汽化罐进行汽化以获得更多的能量。

(3) 双循环发电技术

与前面两种地热发电技术不同的地方在于来自地热水的水或蒸汽不与涡轮机/发电机发生直接接触(图 10-7)。

多数地热资源提供的是中温地热水(低于华氏 400 度)。可以利用双循环发电技术从这类地热流中提取能量。炽热的地热流和比水的沸点低得多的另一种流体流经一个热交换器, 来自炽热地热流的能量使第二种流体瞬间汽化, 生成的蒸汽驱动涡轮。由于工作系统为闭路循环系统, 因此几乎不会向空气中排放任何东西。

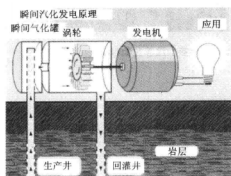


图 10-6 瞬间汽化发电原理

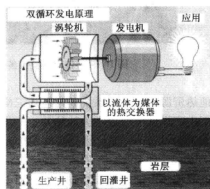


图 10-7 双循环发电原理

蒸汽和热水资源仅仅是地热资源的一小部分。一旦我们能开发出相应的技术, 地球岩浆和热干岩将为人提供便宜、干净、几乎用之不竭的能量。考虑到中温地热资源储量十分丰富, 采用双循环发电技术必将成为最常见的地热发电形式。美国能源部充分认识到了地热电能战略价值, 并通过地热技术发展计划多方位支持其发展。研究发现在地热能成为美国能源构成的关键组成部分之前, 地热能必须首先在经济上具有和传统能源抗衡的竞争力。美国能源部正和地热企业共同努力以实现每度电成本价降到 0.03 ~ 0.05 美元。他们相信在未来 10 年内, 将新增电能 150 亿 W。

10.7.2.2 地热能直接利用基本原理

许多地热资源属于低温地热资源, 因而特别适合进行直接利用。比如美国西部分布有大量低温地热资源, 具有巨大的可直接利用潜力。西部 10 个州的最新调查发现了 9 000 多个热水井和温泉, 900 多个低温至中温的地热资源带, 还有几百个可直接应用的地点。调查还发现了 271 个相关地点——指水温超过 50℃ 的地热资源方圆 8 km 以内的城市——意味着具有良好的近期直接利用潜力。如果这些相关的资源只用于建筑物取暖, 这些城市每年就有节约 1 800 万桶石油的潜力。

低温至中温地热水源(20 ~ 150℃)可直接为民宅、厂房及商场供热。这一档次的地热能在美国分布广, 其应用范围涉及家庭和办公场所的取暖、商用阳光房、养鱼场、食品加工厂、金矿生产及其他许多领域(图 10-8)。地热发电站废弃的热水接下来可以直接被用于其他的

相关领域。

地热能直接用于家庭和商业场所,其成本要比使用传统的燃料便宜得多。与化石燃料相比节省多达80%。同时,地热能的直接使用十分清洁,只产生少量(多数情况下甚至不产生)燃烧化石燃料时所产生的那些空气污染物。

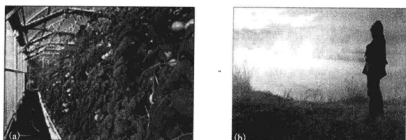


图 10-8 位于科罗拉多的地热暖房(a)和地热加温养鱼池(b)

地热资源直接利用系统通常包括三部分:

- ①生产设施——通常为地热井——将地热水采取至地面;
- ②机械设备——泵、热交换机、控制器——向指定的空间供热或加工处理;
- ③废水处理系统——回灌井或储存池——回收冷却了的地热水。

低温地热资源的主要用途是用于小区和室内加热(图 10-9)、地热暖房和养鱼场。1996 年的调查发现这些用途每年从地热能中使用了 5 800 万 J 的能量——这相当于 160 万桶石油。

在美国,一些地方有超过 120 个的生产点,拥有数以百计的独立系统,都是用地热能进行小区和室内加热。小区地热能系统将来自一个或多个地热井的热水通过一系列管道分配到独栋的住房和楼宇或建筑群的部分楼房中。室内加热地热能则是一个井负责一栋建筑物。上述两种地热能使用系统都是利用地热生产井和分配管道取代传统取暖系统中的燃烧燃料获取热能的方式。



图 10-9 首个现代化地热小区加热系统
——Oregon 技术学院,1964 年建成

与天然气取暖系统相比,地热能小区加热系统能为用户节约 30%~50% 的成本。20 世纪 80 年代的一次调查指出了在美国西部利用小区地热能的巨大前景,该调查发现西部 8 个州有 373 座城市分别位于离 1 277 个地热源头的距离不足 8 km。

地热能暖房和鱼类养殖场(图 10-10)是地热能 in 农业方面的两种主要用途。8 个州拥有 38 个暖房,其中很多占地达数公顷,用于种植蔬菜、花卉、室内植物和树苗。

多数暖房经营者估计使用地热能代替传统的能源,燃料方面的成本可节省大约 80%,总成本可节约 5%~8%。多数地热资源地理位置相对偏僻因而具有一些优越性,比如空气好、很少疾病问题、水干净、人力资源稳定、低税收。

地热资源在工业上的直接应用包括食物脱水(图 10-11)、烘干、采金、牛奶加热杀菌、温泉浴场等。蔬菜和水果的脱水是工业上地热能最常见的用途。地热能最常见的商业用途为温泉游泳池和桑拿浴场。1990 年有 218 处旅游度假区胜地使用了地热水。



图 10-10 位于科罗拉多的地热能养鱼场



图 10-11 位于内瓦达州的农作物脱水加工厂

10.7.2.3 利用地热泵进行取暖或制冷基本原理

地热泵是一种高效再生能源技术,在商住建筑物中得到广泛应用。地热泵可用于室内取暖、降温以及水加热(图 10-12)。

地热泵取暖或制冷技术的最大优点是将存在于自然界的热能收集起来加以利用,而无须依靠燃烧燃料来产生热能。

地热泵技术的出发点是考虑了地表下一定深度的岩体常年能够保持相对恒定的温度,冬天比大气热,夏天比大气冷,酷似地窖的情况。地热泵的基本工作原理是冬天将存在地下岩体或地下水中的热能转换到建筑物中,夏天则将建筑物中的热能排出送入地层中。换句话说,冬天的地层是放热体,而夏天的地层是吸热体。

地热泵系统包含三大主要构件:

- ①地层热连接器系统。
- ②地热泵子系统。
- ③地热能配送子系统。

(1) 地层热连接

利用地层热作为吸放热的源头,一系列地热能循环管道埋在需要空调的建筑物附近地下。循环管道可以采取垂直或水平埋置,它使从周围地层中吸取了热能,或将热能排放到地层的流体(水,或水和防冻剂的混合液体)形成回路。

(2) 地热泵

取暖时,地热泵通过地层连接器从地热流中提取热能并将它们集中起来,然后将它们传递到建筑物中。制冷时,流程相反。

(3) 地热能配送

一般情况下,用传统的通风管实现从地热泵到整个建筑物中冷、热空气的配送问题。

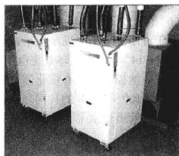


图 10-12 南 Idaho 学院
使用两台 36 t 的地热泵

当地热泵系统工作时,在实现室内加热的同时还可以用来提供家庭用热水。许多家庭设施现在都装备了附加式热交换器,它可以将热泵压缩机中多余的热量传递到家用热水罐中。虽然当地热泵系统不工作的春秋两季,热交换值不能提供热水,然而热泵系统比其他热水加热法要有效得多。为了全方位满足用户对热水的需求,制造商开始提供分体式热交换器。这些造价合理的装备可以和其他任何设备一样迅速地提供热水。

(4) 热泵系统分类

地下循环系统分为四种基本类型。其中水平式、垂直式和储存库式等三种为闭路系统,第四种为开放系统。具体哪一种最有效取决于气候情况、岩土条件、可用的土地以及现场造价。理论上,这四种方法都可以用于住宅和商用场所。

(5) 水平式闭路循环系统

一般情况下,这是用于住宅的最经济的一种方式,尤其是对于有足够用地的新建住宅而言。该系统至少需要 4 ft 深的地沟。最常见的组建方式为:要么使用两套管道,一套埋深 6 ft,另一套埋深 4 ft;要么两套管道并排埋在 5 英尺深的地下,地沟宽 2 英尺。水平式闭路循环管道布置方法(图 10-13)使得在较短的地沟中可以埋放更多管道,从而降低安置成本,并使得原本不能使用常规式水平式循环系统的地方有可能使用水平式循环系统。

(6) 垂直式闭路循环系统

由于可用土地不能满足水平式循环系统的要求,大型商场和学校通常采用垂直式循环系统(图 10-14)。垂直循环系统也用在那些由于土层较浅不能形成地沟的地方,还有,垂直系统可以有效地控制对已有绿化园林的破坏。构建垂直循环系统,须形成孔径约为 4 ft、间距 20 ft、孔深 100~400 ft 的孔网。在每一钻孔中布置两根在底部由 U 形管连接形成回路的管道。各垂直管道由水平干管连接,水平干管埋在地沟中,并与建筑物内的热泵相连。

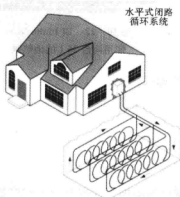


图 10-13 水平式闭路循环系统

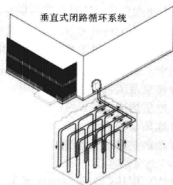


图 10-14 垂直式闭路循环系统

(7) 地热储存库式闭路循环系统

如果现场有一个能满足要求的水体,这可能是利用地热能中造价最低的一种情况。供热(冷)管道有建筑通过地下达到水体,为了防止结冰,捲成线圈状的管道至少放在离地表 8 英尺的地方(图 10-15)。这种方法只能当水体体积、深度和质量都满足要求的情况下使用。

(8) 开放式系统

该系统使用钻井水或表体水作为热交换液，热交换液直接流过地热泵系统(图10-16)。当热交换液流过地热泵系统以后，水流通过钻井、再加热井或地表除热设备后返回地下。显然，这种方法只能在水源清洁、地下水开采符合相关政策和规定的情况下。



图 10-15 地热储存库式闭路循环系统

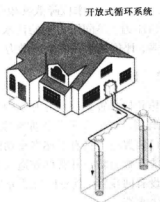


图 10-16 开放式循环系统

10.8 地热资源开发利用技术中的关键——地热井设计与施工

10.8.1 地热井设计要求

图10-17为某地热开采矿山建成的地热井。

地热井是开采地热资源的主要手段。地热井的设计参数、成井工艺和质量对地热资源的经济合理开发利用至关重要。地热井设计与施工时应充分考虑以下因素。

(1) 井深

应穿越设计开采热储层的底板深度。

(2) 井径

上部应满足设计开采年限内下入与井出水量相匹配的深井水泵对井管口径的要求和下入水位监测仪器的要求，下部应满足下入井孔修理设备的要求。

(3) 井斜度

保持垂直，在100 m深度内其井斜不得大于 1° 。

(4) 地层剖面

通过钻井、地球物理测井，取全取准地层剖面地质资料、测温资料，严格划分各热储层顶、底板深度。

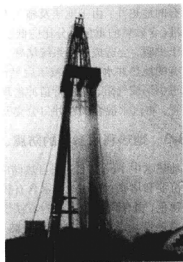


图 10-17 地热井

(5) 止水封孔

对开采热储层顶板以上井段进行严格的止水封孔,防止非开采层或上层低温水的串通和污染。

(6) 完井试验

针对热水井投入生产的需要进行抽水或放喷试验、水质分析及稳态井温测量,准确取得热水的水位、水温、水位降低及相应出水量和水质等资料,对于中、高温热水井,还必须准确测定井口压力,不同压力下的汽水流量和温度、水、汽含量及其比例,分离蒸汽中的不凝气体含量等,评价热水井的生产潜力。

10.8.2 地热井口装置

地热井口装置是地热井开发中最基本的井口设备,是维持地热井生产正常运行,进行热水动态监测,防止由于井管伸缩及地面下降而引起的事故,减少热水的腐蚀作用等所必需的。井口装置应该具有下述多重功能:

①能有效地防止井管伸缩造成的泵座破坏及漏水事故。

②设有回流管,具有回流部分地热水,调节系统供水量的功能,在自流井使用中,可兼做自流供水管。

③设有专门的水位测量孔及配套仪表,使水位监测方便实用。水位监测孔设有专用盲气孔法兰,拆装方便,并能有效地阻止氧气混入热水而造成系统腐蚀。

④水温、水压表由井口装置配备,解决用户基本测量仪表配备不全或不配套。

⑤选择具有抗腐蚀的阀门,对接触地热水的零部件采取防腐措施。

⑥有临时地热水排放孔,便于自流井安装水泵。

为防止地热水在井口与空气接触,减少地热水中氧气与氯离子联合作用时对输水设备的腐蚀危害,在一些有腐蚀作用的地热井的装置中,安装隔氧设备。

有的地热井,由于地质及施工方面的因素,水中的含砂量超过国家规定的工业用水含砂量标准(含砂量的重量百分比应低于 $5 \times 10^{-5}\%$),影响热水的正常使用。若含砂量高的地热水用于供暖,会造成管路系统堵塞,因此对于含砂量超过标准的地热井,应采取除砂措施。

有的地热井水在井口减压后呈汽、水两态,且含有大量的不凝气体,用于供热,会在供热管道中形成气阻,造成管道冲击现象,影响正常供热。对这类地井应采用汽、水分离的井口装置,将汽水混合物在井口分离开来,分别送给用户。

10.8.3 地热利用系统的防腐、防垢

地热水中不同程度的来自热储中的岩粉、岩屑或砂土等碎屑物,长期利用中,可对容器产生沉淀和堵塞;有的地热水含有较高的低价铁和锰,利用中在空气中氧的作用下,使水变成铁锈色,并使陶瓷等容器附着铁锈色,影响水和容器等使用设备的感观;有的地热水含有多种腐蚀性化学组分,往往对地热利用设备造成严重的腐蚀破坏,直接影响设备的使用寿命;还有的地热水矿化度较高,利用时温度降低,会使溶解其中的有些固体物质超过饱和度而在利用系统中产生结垢,造成设备及输水管道的堵塞。为此,利用地热水一般应依据水质条件及用途作相应的处理,使设备保持良好的状态,延长使用寿命。

地热水的腐蚀是地热开发利用中普遍存在的问题之一,由于地热水温度较高,含多种腐

蚀性化学组分,往往对地热利用设备造成严重的腐蚀破坏,直接影响设备的使用寿命。地热热水腐蚀的主要因素是:

①地热水中的氯离子(Cl^-)起腐蚀促进作用。

②溶解氧(O_2)是地热水中最重要的腐蚀性物质。如地热水中含 $3 \times 10^{-5} \text{ mg/L}$ 的 O_2 ,就会使碳钢的均匀腐蚀速度增加4倍。

③硫酸根(SO_4^{2-})起腐蚀促进作用,并对水泥有侵蚀作用。

④地热水若pH低,则可破坏不锈钢的钝性。

⑤硫化氢(H_2S)能与金属离子反应生成硫化物。在无氧条件下,它也腐蚀铁、钢、铜、镀锌管等,尤其是对铜镍合金的影响更为严重。

⑥二氧化碳(CO_2)对碳钢有较大的腐蚀作用,特别是与氧共存时,对钢铁的腐蚀作用会更为强烈。

⑦氨(NH_3)引起铜合金的应力腐蚀破坏。

⑧地热水中总固形物(TDS)值高,表示其具有较高的离子浓度和导电性,从而强化了地热水构成电化学电路和传递腐蚀电流的能力,为腐蚀电池的工作提供了便利条件。

只有弄清了地热水对地热系统设备产生腐蚀的原因,才可能有的放矢地采取防范措施。常用对策如下:

①整个系统采用耐腐蚀材料(包括金属与非金属)。

②对地热系统采取密封措施,不使氧(主要是空气)进入热水系统,也可在系统中加除氧剂(如亚硫酸盐)除氧,达到防腐目的。

③采用在系统中安装换热器的办法,使地热水不直接进入利用系统,地热水只是通过热交换器将热量传给洁净水,从而减轻设备的腐蚀。

④对非传热的金属表面采取涂敷防腐涂料的办法。

⑤针对不同类型的局部腐蚀采取相应的防腐措施。

地热水矿化度较高,在使用中,当水温降低时,会使溶解其中的有些固体物质超过饱和度而在系统中产生结垢,引起井管口径减小,换热设备传热效率降低,输送地热水系统的阻力增加,能耗加大,严重者甚至造成换热设备及管道的阻堵。为此,应采取防结垢的措施。地热利用系统中的水垢按其化学成分分为碳酸钙垢、硫酸钙垢、硅酸盐垢和氧化铁垢。

除垢的方法是:

①机械除垢,一般采用轻型钻机,配备专用钻头,定期清垢;也可用软管钻机通井;

②用高压水泵进行水压破碎;

③用 HCl 和 HF 等溶解水垢。

防垢的方法有:

①化学方法即在地热水中投放酸性溶液,降低热水的pH,使碳酸钙不至沉淀。

②增压法即采用深井泵或潜水泵输送井中地热水,使其在系统中保持足够压力而不发生气化,以防止 CaCO_3 沉淀;垢减轻成疏散状,便于清洗。

③磁法即在地热水输水管线上安装磁法防除垢装置,对地热水进行磁化处理,使垢减轻并成松散状,便于清洗。

④防垢涂层法即选用合适的涂料涂衬在管壁内,防止管壁结垢。

10.9 地热井施工程序与关键环节

10.9.1 地热井施工程序

地热钻井是地热资源开发的重要环节,又是与地热资源勘查、开采权的取得紧密相关,目前通行的地下井施工程序如图 10-18 所示,具体内容见表 10-1。



图 10-18 地热井施工流程图

表 10-1 地热井施工程序

序号	程序
1	向行政主管部门申报地热资源勘查许可证
2	委托地质勘查单位进行地热源勘查并编制提出可行性论证报告
3	上报主管部门组织专家评审论证报告并提出评审意见
4	申报行政主管部门“钻地热井许可证”(附:可行性报告及评审意见、钻井设计等必需材料)
5	委托钻井施工单位
6	委托钻井施工监理单位
7	钻井施工开工仪式与现场技术交底
8	钻井地质编录与地球物理测井
9	钻井井管(井口管、表层管、井壁管或滤水管)下入与固井
10	钻井洗井与井产能测试
11	编写并提交完井报告,内含地质、钻井施工及质量监理三部分
12	地热钻井成井质量现场验收

10.9.2 地热井施工关键环节

地热钻井能否取得成功必须在一份好的可行性论证报告为依据所编制的地质设计指导下,正确地组织钻井施工,并把握好以下几点:

- ①钻机设备选型应留有加深钻井深度的余地;
- ②尽可能保持钻井的垂直,以降低井内事故和井壁管受磨损;
- ③准确的钻井地质编录,正确地进行地质分层,依据钻井中的地质变化对可能出现的问题作出判断并找出对策;及时修改完善地质设计;
- ④保持合理的井身结构并严格的固井:表层管口径及下入深度应充分考虑取水设备口径和下入深度的需要;井壁管应下入热储一定深度并严格封闭热储顶板上部各层位;尽可能做到 3 径或 4 径至孔底;
- ⑤严格使用冲洗液钻井,热储层内钻井严禁使用稠泥浆;

⑥及时进行地球物理测井：下入表层管、井壁管前及达到设计深度时均应测井，以结合地质编录进行地质分层、了解地层温度变化和热储的渗透性、含水性特征，指导钻井施工；

⑦搞好洗井与产能测试钻井完工应及时进行洗井和产能测试，严禁停滞时间过长，洗井应针对热储地层特征、钻井深度、使用泥浆性质和稠度采用不同的方法；产能测试应满足规范的要求。

10.9.3 地热井工程的划分

一项建井工程从施工准备工作开始到竣工交付使用，要经过若干工序、若干工种的配合施工。工程质量的优劣，取决于各个施工工序、各工种的管理水平和操作质量。因此，为了便于质量管理和质量控制，针对地热井(水井)工程工艺流程特点，将一个水源地工程项目划分若干个以单井为单位的单位工程，一个单位工程划分若干个分部工程和分项工程(表10-2)。

表 10-2 地热井分项、分部工程的划分

序号	分部工程	分项工程
1	钻井	钻机安装, 钻探, 钻头, 钻具, 钻井液, 地质录井, 物探测井, 下管, 填砾, 固井(止水), 井管, 黏土粉, 滤料, 焊接, 水泥等
2	洗井	活塞洗井, 压风机洗井, 化学药剂洗井, 酸化洗井, 二氧化碳洗井, 水泵抽水洗井, 水位观测, 水量观测, 水温观测等
3	抽水试验	水泵抽水, 水位观测, 水量观测, 水温观测, 含砂量观测, 水质检验, 探孔等
4	泵房建设	工程测量, 地基, 混凝土, 构件安装, 防水, 钢筋, 砌砖, 焊接, 地面, 内外墙饰面, 门窗安装, 井口处理等
5	供水设备安装	水泵, 设备, 材料, 水泵下井, 管线安装, 电器设备安装, 水处理设备安装, 供水调试等

地热井详细施工工艺流程参见图10-19。

10.10 地热水开发利用系统基本构成

图10-20是地热水供暖系统示意图, 图10-21是某地热水开发利用系统的基本构成图。

本工艺为曝气接触氧化法除铁工艺, 通过除砂器将原水中的砂粒分离沉降, 空气压缩机通过铁管曝气装置向地热水中均匀充入空气, 经溶氧曝气器使气水充分混合, 将水中 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} , 同时氧化和驱散一部分 H_2S 气体, 再经除铁、锰设备、活性炭过滤设备(由优质天然矿物填料级配而成)吸附过滤去除 Fe 和 H_2S 气体, 净化后的地热水可直接进入水箱。由于一般曝气氧化法不加催化剂, 故氧化速度缓慢, 但当曝气后地热水经滤层过滤时, 水中 Fe 被滤料吸附逐渐生成具有催化作用的铁质或锰质活性滤膜(其中生长有含铁嘉氏铁杆菌, 单细胞铁细菌, 锈色披毛菌等铁、锰细菌), 在此滤膜催化作用下铁、锰氧化速度会大大加快进而被滤料除去。

本工艺采用磁化—曝气—锰砂—活性炭过滤处理流程, 可同时除铁和硫化氢, 去除异

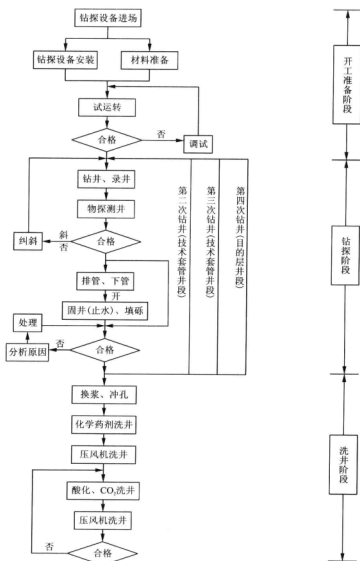


图 10-19 地热井施工工艺流程详图

味,保证出水质量达到地热用水标准。本工程采用封闭式治理流程,能够最大限度地减少热损耗。地热水由深井泵进入钛管曝气装置,通过空气压缩机向其中均匀充入空气,初步氧化并去除部分硫化氢异味;再经除砂器使地热水中的砂粒沉淀下来,然后通过溶氧曝气器混合反应、锰砂过滤、活性炭过滤吸附去除水中铁及残余的硫化氢异味;经上述过程处理合格后的出水进入储水箱然后通过供水泵直接打入供水管道供别墅使用。

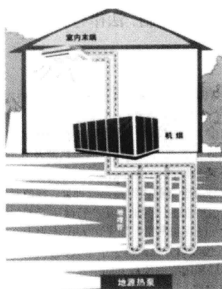


图 10-20 地热水供暖系统示意图

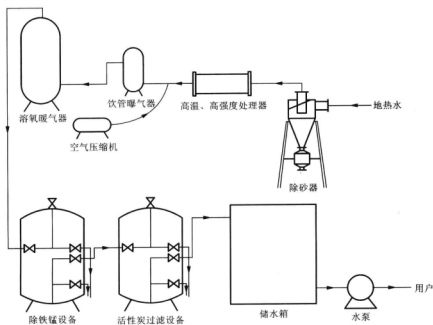


图 10-21 地热水开发利用系统基本构成

10.11 中国地热资源管理体制、法律与制度

10.11.1 管理体制

自1986年《矿产资源法》颁布至1998年4月以前,地热资源由中央、省(自治区、直辖市)、地(市)、县各级地质矿产行政主管部门实行统一管理,中央地质矿产主管部门对全国地热资源及其勘查、开发利用、环境保护行使统一监督管理的职能。省(自治区、直辖市)、地(市)、县各级地质矿产行政主管部门对辖区内的地热资源及其勘查、开发利用、环境保护行使监督管理的职能。有以下两种情况:①在城市区内有地热资源可供开发利用的城市,一般在市地质矿产主管部门或其他综合部门内设地热管理处,行使对地热资源开发利用的统一管理;②一般地区的地热资源由所在地区的地质矿产行政主管部门统一管理。管理体制如下:

1998年3月10日中华人民共和国第九届全国人民代表大会第一次会议,通过了国务院机构改革方案。1998年4月按改革方案撤销了中华人民共和国地质矿产部,由地质矿产部、国家土地管理局、国家海洋局和国家测绘局共同组建了中华人民共和国国土资源部。有关地热管理职能改由国土资源部行使。

10.11.2 管理法规与制度

地热资源属矿产资源范畴,在中国的矿产资源分类中,列入能源矿产类。地热资源的勘查与开发,执行《中华人民共和国矿产资源法》及其配套法规,包括:《矿产资源补偿费征收管理规定》、《矿产资源勘查区块登记管理办法》、《矿产和地下水勘探报告审批办法》、《矿产储量登记统计管理办法》、《矿产资源开采登记管理办法》、《探矿权、采矿权转让管理办法》、《全国地质资料汇交登记管理办法》等。1998年3月以前在中央由中华人民共和国地质矿产部对其行使管理职能;在地方,由省(自治区、直辖市)地质矿产行政主管部门根据中央与地方的分工管理权限履行相应的管理职能。具体包括:

(1) 地热资源勘查登记

对探(采)矿权人申请勘查地热资源或探(采)结合建地热井,依照《矿产资源勘查区块登记管理办法》进行登记,办理地热资源勘查许可证。

(2) 储量审批

对探(采)矿权人经勘查探明可提供开发利用的地热资源可开采储量,由矿产储量审批机构依照《矿产和地下水勘探报告审批办法》进行审批,批准其可采储量及其开采范围,作为申请开发利用地热资源的依据。明确地热资源可采储量未经批准不得提供开发利用。

(3) 地热资源储量登记统计

依据《矿产储量登记统计管理办法》对探(采)矿权人探明的并经矿产储量审批机构批准的地热可开采储量进行登记,并对申报登记情况进行监督,建立国家统一的地热资源(储量)数据库。

(4) 地热资源开采登记

依据《矿产资源开采登记管理办法》对探(采)矿权人申请开采地热资源的地区范围、开采深度、开采水量进行审定,办理开采许可证。

(5) 地热资源开发监督管理

对地热资源的开采量、开采中的水质、水位、水温、水量动态,及开采引起的环境地质问题,如地热水位下降速度和幅度、地面沉降、环境污染等进行监督管理,依据《矿产资源补偿费征收管理规定》征收地热资源补偿费。

(6) 地热地质资料汇交管理

依据《全国地质资料汇交登记管理办法》对探(采)矿权人进行地热地质勘查的地质资料(报告)的汇交情况进行监督,推进地热地质勘查资料的汇交,建立全国地热地质资料库。

一些地区,尤其是地热资源开发早、利用单位多、供需矛盾比较突出的城市地区的地热田开发,当地政府为加强所在地区地热资源勘查开发的管理,合理地利用宝贵的地热资源,以更大的发挥开发利用地热资源的社会经济效益,建立了相应的地热管理机构,制定地热资源勘查开发的地方性法规,对地热资源的开发利用实行统一管理。北京、福州、天津、西安等城市地区的地热田,都相继建立了这样的机构。他们本着对地热资源开发利用实行“统一规划、统一管理、合理布局、综合利用、以热养热、滚动开发”的方针进行管理,使地热资源的开发逐步走向法制管理的轨道,他们的通行做法是:

①以《中华人民共和国矿产资源法》为依据,制定由地方政府颁布的地热资源管理法规及其实施细则,依法行使对地热资源开发利用的行政管理职能。

②组织专家审定地热资源开发的申请,向申请单位签发开采或建地热井的批准书。

③对地热开发单位开发利用地热资源的情况实行监督管理,包括:制定开采计划、下达开采指标、开采计量、核实开采量、收取开采资源补偿费等。

④组织建立并完善地热资源开采动态监测系统及开采动态长期监测的实施。根据地热资源开采的实际需要,组织对地热田的可采资源进行重新评价,以指导地热资源的进一步开发与管理。

⑤推进地热资源的合理利用、综合利用与科学利用,提高地热资源开发利用的科技水平。针对地热资源开发利用中出现的实际问题,提出研究课题,从收取的地热资源补偿费中安排部分经费,组织专家开展专题研究,对开发利用中的成熟技术加以推广。

⑥建立地热资源及其开发利用的数据库,推进管理工作的信息化、科学化。

⑦加强地热开发单位的联系,以跨地区、跨部门建立的行业协会——中国矿协地热资源开发管理专业委员会为纽带,进行地热资源开发与管理的经验交流与信息沟通,推进地热资源开发利用与管理水平的普遍提高。

在这方面比较典型的作法有北京、福州、天津等地。如北京市人民政府为合理开发利用和科学管理保护本市的地热资源,成立了北京市地热管理处(设在北京市地质矿产局内),并于1985年6月颁布下发了《北京市人民政府关于加强地下热水资源管理的暂行规定》,在该“规定”中,对加强北京市地下热水资源管理作了如下规定:

①本市地下热水的开发利用与保护,由北京市地质矿产局地热管理处(以下简称市地热处)统一规划、统一调度、统一管理。

②在本市范围内,任何单位和个人开发利用地下热水,均必须遵守本规定。

③开凿地下热水井的单位,包括开凿探采结合井、回灌井、试验井的单位(以下简称用水单位),必须提出设计方案、利用计划和回灌措施,向市地热处申请,经审核同意,发给《开凿地下热水井批准书》。

用水单位凭《开凿地下热水井批准书》，向城市规划管理部门申请凿井用地和地上建筑。经批准领得用地许可证和建设施工许可证后，方可施工。在规划市区和郊区的城镇、工矿区、文物保护区、风景游览区、水源保护区等规划范围以外的地区凿井，须经农村土地管理部门批准。

新凿地下热水井，应按技术要求施工，竣工验收合格后，由用水单位持验收报告向地热处申领开采许可证。未领得开采许可证的，不得擅自开采。

④用水单位要安装地下热水井水表，按规定向国家交纳水费。水费标准：70℃以上（含70℃）的热水，每吨8分；51~70℃的，每吨6分；50℃以下（含50℃）的，每吨4分。农、林、渔业以及营业性浴池、游泳场使用50℃以上的热水，每吨4分；不足50℃的，每吨2分（1998年4月1日已改为：宾馆、旅游饭店用地热水，60℃以上（含60℃）每吨0.80元；50~60℃的，每吨0.70元；50℃以下（含50℃）的，每吨0.60元。一般生产、生活用地热水，60℃以上（含60℃），每吨0.40元；50~60℃的，每吨0.35元；50℃以下（含50℃）的，每吨0.30元。农业用地热水不收费）。

⑤用水单位要实行计划用水、节约用水。市地热处按年向各用水单位下达用水计划和节水指标。各用水单位按计划采水，并负责水井的维护和管理。对超计划用水单位，实行超量累计加价收费，超用量在计划指标51%~99%的按原价的5倍收费。对过量开采，浪费严重的，应责令其停止用水。

⑥新凿地下热水井的单位，要在凿井施工后安装水表。本规定发布前已有的地下热水井，由用水单位在本规定发布后的半年内，安装水表，并向市地热处补办用水审批手续。对逾期不安装水表，不补办审批手续的，按其水泵额定流量计收费。

⑦有条件的用水单位应积极进行人工回灌热水。但回灌前要经环境保护、卫生部门对回灌水的水质进行鉴定，并报市地热处批准。

经批准人工回灌热水的，可按回灌热水的温度、水量，相应减收水费。

⑧用水单位要接受环境保护部门、卫生部门的指导和监督，严防污染。报废热水井，要报市地热处，按规定处理，防止污染和破坏热田；排放地热废水，要防止污染饮用水源和环境；热水用于医疗、洗浴、灌溉、养鱼和其他饲养业的单位，要按环境保护、卫生部门的要求，经常进行水质检查，确保人民的健康。

⑨凡批准开采的热水井，均应计划利用。在半年内无故闲置不用的，要按市地热处的规定，由用水单位交纳闲置费。

⑩对违反本规定，擅自开凿热水井，或未经批准擅自采水，或擅自改变采水用途的，由市地热处责令其停止施工，查封水井，并处以成井费用的50%~100%的罚款。同时，由城市规划管理部门按违章用地、违章建设论处。

罚款和超计划用水加收的水费、热水井闲置费，企业单位由税后利润中列支，不得计入成本；行政事业单位由包干经费中列支。

罚款一律上交市财政部门，用于本市地热资源的保护和管理。

⑪本规定自1985年7月1日起实行。执行中的具体问题由市地热处解释。

为全面准确地实施上述规定，北京市人民政府还于1989年10月颁布了《北京市人民政府关于加强地下热水资源管理的暂行规定的实施细则》，对一些具体问题作了进一步的规定。

中国一些开发利用较好的地热田的管理也有类似的做法，新开发的地热田，也在仿效这

方面的作法,地热资源勘查与开发正在步入“法制”管理的轨道。

10.12 地热资源开发利用实例

无论国外还是国内,地热资源开发利用实例比比皆是,有些已经投入使用,有些正在规划建设当中。

比如,北京通州台湖九年一贯制学校利用地源热泵建成了节能校园。该校利用地源热泵系统为教室供冷暖。利用地热能源的具体做法是在操场下打了401眼深120 m的地热井,通过地源热泵系统,将恒温16℃的地热水,抽到埋设在建筑内长11万 m的管线中。冬季,只需少量的电能把地热水加热,就可使室温达到22~25℃;夏季,16℃恒温地热水进入建筑内的管道中,可降低室温。仅采暖一项就能节约八成煤火费,每年大约160万元。

又如,河北广平县研发了一个完整的地热水资源循环利用链条,实现了“一水四用”:62℃的地热水从井口流出用于供暖;然后流入工厂化养鱼车间,用于热带鱼养殖;水从工厂排出后,再用于水培蔬菜种植;最后流入农田,用于灌溉。

2001年,广平县冀南井业有限公司打了一眼深达1 600 m的热水井,成功开发出了地热水资源。出口水温达62℃,每小时可产热水80 m³。专家鉴定,该水含有对人体有益的多种微量矿物元素。起初,该公司仅利用地热水供暖和洗浴。洗浴后的水温还有35℃,白白流掉十分可惜。为了充分利用这一地热资源,发展循环经济,在进一步的调查和研究中,该公司了解到热带鱼养殖市场前景十分广阔。很快,他们解决了洗浴用水的净化难题,并高薪聘请热带鱼养殖专家出谋划策,搞起了热带鱼养殖。如今,该项目可年产罗汉鱼、锦鲤、鹦鹉鱼、银燕鱼、地图鱼等各种珍稀热带观赏鱼2 000万尾。并建成了全国首家淡水鲨鱼国内繁殖基地,实行自繁自养。工厂化养鱼项目成功后,公司并没有停止对地热水资源循环利用的探索,从工厂排出的水,又被利用到了水培蔬菜种植和农田灌溉上。

在国外地热能的开发利用研究与实施

工作也方兴未艾。据俄罗斯媒体报道,澳将建首座使用“干热岩”技术的地热发电站。图10-22为“地球动力”公司设计的地热发电站运行示意图。建成后的发电站将完全依赖通过钻探所获取的地层深处热能。

地下热能是一种可用来替代石油等化石燃料的“清洁能源”。目前,地热资源在美国、冰岛、日本、新西兰和菲律宾等国均已投入商业应用。俄罗斯也于数年前在堪察加半岛建造了首座“穆特诺夫”地热发电站。但是,到现在为止,所有地热发电站使用的均是直接来自地下热源的水蒸气。



图 10-22 “地球动力”公司设计的
地热发电站运行示意图

而澳大利亚“地球动力”公司计划建造的地热发电站将首次直接从地层深处获取发电所需的热能。他们使用的是一种被称为“干热岩(HDR)”的技术——先通过加压的方式将水注入深度在3 000~5 000 m之间的钻孔中,当遇到地下高温的花岗岩后,这些水会在瞬间被加热为沸腾状态并从附近的另外一处钻孔中喷出地面。喷出的热水将被注入到一个热交换器中以便将其他沸点较低的液体加热到气态——生成的气体将用来驱动蒸汽涡轮机以产生电能。而冷却后的水将被再次注入上文提到的钻孔中。

“干热岩”存在于地壳浅层的某些构造区,是一种清洁的热能供应源。初步的计算显示,地壳中“干热岩”所蕴含的能量相当于全球所有石油、天然气和煤炭所蕴藏能量的30倍。

当然,并不是在任何地区都可应用这项技术——电站所在地必须埋藏有温度不低于250℃的花岗岩。温度在该技术的应用中起着关键性的作用——花岗岩的温度每下降50℃,发电成本便会增加一倍。

“地球动力”公司在南澳大利亚沙漠中找到了一处理想的建站地点。该公司目前已在那里钻探出了两个深度达4.5 km的深孔。据悉,钻孔底部的温度达到了270~300℃。“地球动力”公司现在正在对该地区的热能储量进行评估。初步的分析显示,从这两个钻孔中至少可以获取10亿W的电能。

据“地球动力”公司公布的数据,利用地热进行发电的成本与那些以煤炭和天然气为燃料的火力发电站的成本大体相当,是风力发电的一半,只有太阳能发电的1/8~1/10。

第11章 极地与太空资源的开发与利用

11.1 极地与太空资源概述

11.1.1 概述

矿产资源是人类赖以生存和发展的物质基础,没有矿产资源,便没有陶瓷、塑料、钢铁和石油等。地球资源的枯竭,已使我们的生存环境恶化,而且还在继续恶化并有加剧的趋势。今天,随着地球资源的不断被开发利用,人类所面临的人口、资源、粮食、环境、能源等几大问题日益突出。能否及时有效地解决这些问题所带来的困扰,成为人类能否安全、持续发展的关键。综观各方面的因素,解决人类能源短缺的主要手段不外乎两个方面:一是继续向地球本身要资源加大开发利用南北极矿产资源;二是向太空要资源。显然,从现有的科学技术水平和经济效益出发,人类首先应立足于地球,充分利用先进的科学技术并挖掘其潜力,深化和扩展已有矿产资源的综合开发和利用,并加大对新型资源和极地资源的勘查与开发利用力度。同时,人类也应有走出地球、探索太空的勇气,加快开发利用太空这块“风水宝地”的速度。

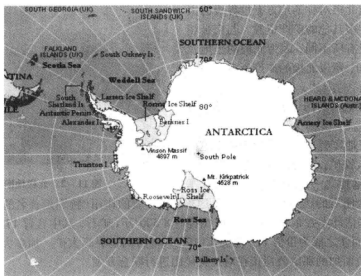


图 11-1 南极地图

11.1.2 南极矿产资源

如图 11-1 所示, 南极是一片相当广阔的区域, 它不专属于某一个国家, 是人类共同拥有的财产。南极地区的矿产资源极为丰富, 在资源危机四伏的当今世界, 大多数人首先关心的是资源量的多少。各国不仅在极地进行科学考察活动, 也进行资源勘察工作。据已查明的资源分布来看, 煤、铁和石油的储量为世界第一, 其他的矿产资源还正在勘测过程中。在南极地区, 可望发现更多更丰富的矿产资源, 为人类利用这些资源提出科学依据。

南极大陆二叠纪煤层主要分布于南极洲的冰盖下面, 储量约为 5 000 亿 t。

铁矿是南极最富有的矿产资源之一。在南极大陆, 主要分布在东南极洲。据科学家们勘测, 在查尔斯王子山脉南部的地层内, 在晚太古至元古代, 有一条厚度达 400 m, 长 120 ~ 180 km, 宽 5 ~ 10 km 的条带状富磁铁矿岩层, 矿石平均品位达 32% ~ 58%, 是具有工业开采价值的富铁矿床, 初步估算其蕴藏量可供全世界开发利用 200 年, 是当今世界最大的富铁矿藏。有趣的是, 如果沿着南极洲查尔斯王子山脉所在的经度范围(北纬 60 度至北纬 70 度)一直往北走, 几乎在相同经度差不多对称的北极地区, 又是一片世界级大铁矿区。

南极地区的石油储存量约 500 亿 ~ 1 000 亿桶, 天然气储量约为 30 000 ~ 50 000 亿 m³。南极的罗斯海、威德尔海和别林斯高晋海以及南极大陆架均是油田和天然气的主要产地。

南极地区, 有待查明的各种资源还很多, 加上各国资源勘探结果还未完全公开, 因此, 还有待科学家们进一步努力。问题在于, 为了保护南极这块世界上最后的净土, 国际社会曾决定在 50 年内禁止开采南极矿产资源。

11.1.3 北极矿产资源

如图 11-2 所示, 北极也有大片的海洋和陆地, 除了在南北极对称的地方有世界级的大铁矿外, 还有许多其他的矿产资源。与南极相比, 北极的情况有所不同, 因为北极的土地及其资源分属各国, 所以北极的矿产资源开采不受国际法(公约)的限制, 但归属于不同的国家, 主要有前苏联、美国、加拿大、丹麦、冰岛、挪威、瑞典。

目前, 北极地区有享誉世界的芬诺斯堪的亚和科拉半岛大铁矿, 还有世界上最大的铜-镍-钪复合矿基地之一的诺里尔斯克矿产地。贵金属和金刚石的诱惑对前苏联开发远东起了重要的作用(特别是著名的科累马地区)。在阿拉斯加, 据估计库兹布北部的红狗矿山拥有 8 500 万 t 矿石, 其中含锌 17%, 铅 5%, 银每吨 75 克, 从而使之成为价值 111 亿美元(1983 年价)的世界级大矿。加拿大的考明克跨国矿业公司和阿拉斯加的纳那公司正在对红狗矿山进行联合开发。

在阿拉斯加-朱诺石英脉型金矿区, 从 1880 年到 1943 年已生产了 108.5 t 黄金, 估计尚有 13.2 t 待开采。西特卡附近的奇察哥夫矿曾产金 24.8 t, 仍含 9.3 t 待开采。贵金属矿的开发在白令海峡两岸此起彼伏。虽然阿拉斯加的许多金矿即将枯竭, 但一项日处理矿石 200



图 11-2 北极地图

t 的庞大计划正在拟议中。另外,格林克里克银矿是全美最大的潜在银矿,1988 年开发后,生产能力为日处理 1 000 t 矿石,估计可采 10~30 年。

除上述矿产资源外,那里还储有铀和钚等放射性元素,被称为战略性矿产资源,如威尔士王子岛上的盐夹矿就蕴藏有 28.5 万 t 钚矿石。

11.1.4 太空矿产资源

太空资源主要指除地球以外,太阳系中包括月球在内的其他小行星、彗星、行星和其他天体上所蕴藏的矿产资源。它们是很多陨石的母体,其中距地球较近的被称为“阿波罗”的小天体中,直径大于 100 m 的个体就大约有 1 000~2 000 颗。它们中有一些几乎由纯金属组成,除铁以外,有的含有丰富的镍,最高镍含量可达 65%,要知道地球上最富的镍矿石,仅含镍 2%~3%;还有的含钴、铬、锰、铝和金、铂等贵金属(图 11-3)。

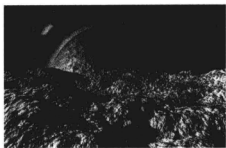


图 11-3 小行星表面上发光的金矿脉猜想

虽然月球只是亿万星辰中的小小一员,但却并不是一个普普通通永远围绕地球旋转不停的卫星。对人类而言,月球不仅是人类踏足浩瀚宇宙的前哨站,更是人类赖以生存的资源存储仓库。月球上的资源对人类来说价值惊人。

月球有丰富的矿藏,据介绍,月球上稀有金属的储藏量比地球还多。月球上的岩石主要有三种类型:第一种是富含铁、钛的月海玄武岩;第二种是斜长岩,富含钾、稀土和磷等,主要分布在月球高地;第三种主要是由 0.1~1 mm 的岩屑颗粒组成的角砾岩。月球岩石中含有地球中全部元素和 60 种左右的矿物,其中 6 种矿物是地球没有的。

月球上的玄武岩里钛铁矿的体积占 25%,钛大概有 100 万亿 t 以上。将来人类能直接用这种石头生产水、液氧燃料等资源。地球上稀缺的铀、稀土等,在月球上也相当充足。特别是月球土壤中特有的氦-3,将改变人类社会的能源结构。月球表面土壤中蕴藏着几百万吨的氦-3,这是一种高效、清洁、安全的核聚变燃料,1 t 的氦-3 所产生的电量足以供全人类使用 1 年。月球上丰富的硅、铝、铁等金属资源同样是未来地球矿产资源的巨大储存库。

11.2 极地资源的开发与利用前景

在极地资源中,由于南极的特殊地理、资源以及政治和经济地位,南极资源的勘查、开发和利用已经受到世界各国的强烈关注。因为在荒无人烟和号称生命禁区的南极大陆,蕴藏着十分丰富的人类共有的矿产资源,其矿藏储量之大为地球之最。根据对南极的初步勘探结果,在不久的将来有可能被人类开发利用的主要矿床有超大型铁矿、超大型煤矿、有色金属矿产以及石油和天然气。

(1) 超大型铁矿

铁矿是南极大陆所发现的储量最大的矿产,主要位于东南极洲。东南极洲前寒武纪地区包含的太古代和早至中元古代的条带状含铁岩层分布十分广泛,它们在澳大利亚、印度、南

非和南美等冈瓦纳大陆的前寒武纪地质区均有发现。然而,由于南极洲自然条件十分恶劣,南极洲的低品位铁矿资源,在勘探和开发方面有许多不利因素,经营费用势必十分昂贵。所以在世界其他大陆的铁矿资源还未耗竭之前,人们还不会去南极洲进行铁矿开采,也就是说,南极洲的铁矿资源在近几十至上百年内还不具有开发价值和经济价值。

(2) 特大型煤矿

南极大陆上发现的煤田很多,而且许多煤层直接露出地表(图 11-4)。南极横贯山脉的煤田,可能是世界上最大的煤田。从维多利亚地中部到瑟伦山的南极横贯山脉含煤岩系中,厚约 500 m 的二叠纪砂岩中分布着多层煤层。煤层厚度从几厘米到几米,最厚可达 5 m。这些煤层呈透镜状,水平延伸一般小于 1 km,煤质从低挥发性的烟煤到半无烟煤,含灰量为 8%~20%。



图 11-4 位于南极的露天煤矿

在乔治五世地的霍恩崖、毛德地的海姆弗伦特山脉、埃尔斯沃思山脉和霍利克山脉的相同沉积地层中,也有发现煤的报道。在查尔斯山脉北部比弗湖附近的二叠纪沉积地层中,发现厚度为 2.5~3.5 m 的煤层,煤质优良。科学考察资料表明,南极大陆二叠纪煤层广泛分布于东南极洲的冰盖下的许多地方,其蕴藏量约 5 000 亿 t。

鉴于南极洲煤田开采和运输方面的巨大困难,在世界其他各大陆煤矿资源尚未枯竭或能找到代替能源之前,南极洲的煤矿不大可能成为世界的可用能源。当然,有朝一日,南极洲沉睡的巨大煤田是有可能被人类开发利用的。

(3) 有色金属矿产

南极洲地域广阔,与地质构造和地质历史相似的其他大陆比较,可能潜藏有丰富的矿产资源。由于南极大陆面积的 98% 被巨厚的冰盖所覆盖,因此地质调查工作十分困难。目前的地质调查仅限于无冰区和南极大陆沿岸,着重研究南极地质构造和地层的小比例尺的区域地质填图。作过 1:2.53 大比例尺地质填图的地区,不超过 100 km²。根据各国的地质调查资料估计,南极洲可能有矿床在 900 处以上,其中在无冰区有 20 多处。已发现的矿床、矿点 100 多处。除铁和煤之外,有南极半岛的铜、钼以及少量的金、银、铬、镍和钴;南极横贯山脉地区的铜、铅、锌、银、锡和金;东南极洲的铜、钼、锡、锰、钛和铀等有色金属。

南极洲的有色金属矿产主要分布在西南极洲的安第斯成矿区,含南极半岛、埃尔斯沃思地、玛丽伯德地。该区北部可能与南美的安第斯山脉相连,南部与新西兰为邻。该区时代为中至新生代,主要矿产为铜,还有铁、铅、锌、金、银等。这些矿种多与钨碱性侵入岩有关。可进一步划分为铜亚区(主要是整个南极半岛)和铁亚区(主要是半岛西部)。

与前述的铁、煤资源一样,南极的有色金属与贵金属矿产,经过地质学家们多年的考察研究,已初步发现了它们的分布规律。那就是南极半岛的铜矿及与它共生的有色金属矿特别多,这种伴生现象与南美洲西部世界上有名的安第斯山铜矿带十分相似,这无疑是同一安第斯构造带向南极洲的延伸。而东南极洲沿海地区的铁矿、铀矿和其他许多矿点生存的地质条件,又同澳大利亚、印度和南非已发现的一些同类型大矿床不尽相同,这就提供了在南极洲

上找到重大矿床的可能性,关键在于提高科学研究水平和改进找矿的技术手段。随着科学技术的高度发展和其他大陆上矿产资源开发利用的枯竭,有朝一日,南极大陆上的矿产必将对人类有较大的实用经济价值。

(4) 石油和天然气

1973 年执行深海钻探计划 (DSDP) 的美国钻探船“格洛玛·挑战者”号,在罗斯冰架外的大陆架区 4 个站位上进行钻探,那里的沉积物厚度达 3 000 ~ 4 000 m。钻这 4 个孔的目的旨在研究那里沉积物的沉积史。因此,所选的钻探站位故意避开过去从海洋地球物理研究角度认为沉积地层可能有含油构造的区域。然而,这 4 个钻孔中有 3 个仅钻到 45 m 深时就喷出了大量的天然气。为了使烃类不再外溢,保护南极自然环境免受污染,他们不得不马上用水泥将井口封住。尽管美国严加保密,这一消息还是不胫而走,使人推测罗斯海盆地可能储有重要的烃类化合物资源。特别是上述 4 个钻孔都避开了很有可能蕴藏着烃类化合物的沉积层已知凹陷构造区,这不能不使人们对南极大陆周围海域的石油资源更加关注。

根据近 20 年在南极大陆周围海域的海洋地质和地球物理调查的资料,认为在南极大陆周围海域可能潜在油气资源的沉积盆地有 7 个。它们是,威德尔海盆、罗斯海盆、普里兹湾海盆、别林斯高晋海盆、阿蒙森海盆、维多利亚地海盆、威尔克·斯地海盆。

图 11-5 为南极大陆及其毗邻地区的石油开采区、勘探区和潜在勘探区。

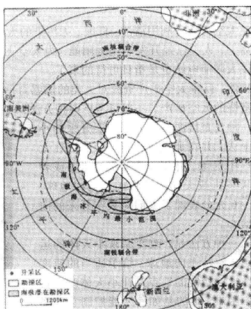


图 11-5 南极石油开采区、勘探区和潜在勘探区

11.3 太空资源的开发与利用前景

太空蕴藏着取之不尽的宝贵资源。茫茫太空为人类提供了高远位置、微重力、高真空、无污染、太阳能和其他丰富的物质资源,概括起来包括轨道资源、环境资源和天体矿物资源。这些太空资源的探测和开发利用,将带来人类文明的新进步。

从太空观测地球是太空资源开发利用的一个重要内容。在高远的太空轨道上,运行的人造卫星、空间站等航天器观测人类赖以生存的地球,可以快速地追踪地球的变化,监测和预报台风、飓风、火山爆发、森林大火、洪水、地震等自然灾害;可以穿云破雾观测大气地表的变化,对大地和海洋进行高精度测量,成为气象预报、地球资源勘探、环境监测的重要信息来源。仅美国每年从地球资源卫星获取的收益就达到 40 亿美元。气象卫星为天气预报提供了大量的实时云图,大大提高了灾害性天气预报的准确率,每年减少经济损失几十亿元。

在太空进行卫星通信和导航定位是太空资源开发利用的一个主要领域。现在通信卫星已广泛用于国际通信、国内或区域通信、军用通信、移动通信、电视直播、中继通信等领域，卫星通信广播的成果，如电视、电话、传真、医疗、教育等，已成为人们生活中不可或缺的一部分。导航卫星在世界范围内提供了全天候、全天时卫星导航定位信息，它不受气候条件和航行距离的限制，具有高精度、能覆盖全球和用户设备简便的优点，可以使铁路、公路、海洋、航空的运输更加高效安全，在国民经济和国防建设中有重要意义。

太空微重力、高真空环境为空间新产业发展开辟了新的途径。太空微重力的开发利用，推动了流体力学、材料科学和生物技术的发展，在材料、制药、农业、电子等领域显示巨大的发展潜力，在太空已生产出了一些高纯度、高质量、在地面无法制造的特种合金、半导体材料和特殊药品。

在太空可充分利用清洁、低廉、无污染的太阳能资源。在各种人造卫星、探测器和载人航天器上，人类已经开发利用太阳能，为太空飞行实验提供了可靠而充足的电力能源。在太空建设太阳能电站也是指日可待的事了。

当然，巨量太空矿产资源对人类的诱惑力是不言而喻的，问题在于我们怎样去开采利用这些富饶的太空矿产。一般可考虑两种方法：

一种是直接派机器人到拟要开采的小天体上去，并在那里进行开采，然后在太空工厂中提炼，并用于太空制造业，或者用航天飞机或天梯运输将矿产运回地球。图 11-6 充分表现了人们对太空开采的向往和信心。

另一种方法是，改变原来小天体的运行轨道，使其飞向地球，给予适当的速度降落在人们指定的地点。让小天体改变轨道并不困难，难的是如何才能控制它的降落速度和地点，使它坠落后不导致大碰撞产生灾难。

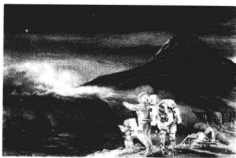


图 11-6 宇航员向往降落在可能
蕴含丰富矿藏的星球上

11.4 离人类最近的太空资源——月球资源

近 50 年来，月球探测在人类宇宙探测历程中占有重要的地位。尽管目前我们对月球的认识还很肤浅，但是可以说，月球是人类探测与研究程度最高的地外天体。图 11-7 为 1969 年 7 月，美国宇航员阿姆斯特朗乘坐阿波罗 11 号，完成全球第一次登月行动。时至今日，月球对于人类太空科技的发展已经越来越重要。进入 21 世纪，人类对月球探测的热情有增无减，探测的规模更大，参与的国家更多，重返月球、建立月球基地的目标更为明确，月球资源的开发利用已经提上了议事日程。

中国的月球探测工程已经排出了时间表：2007 年完成绕月工程，2010 年完成落月工程，2020 年完成返回。

月球几乎没有大气层，属于超高真空状态，由于没有大气的热传导，月球表面昼夜温差

极大(140℃);月球没有全球性磁场;月球的内部能量已近于衰竭;月球表面还具有高洁净、弱重力的特征。因此,在月球表面建立天文观测站和各种科学研究基地,有特殊的优势;月球的特殊环境为研制特殊生物制品和特殊材料开拓了广阔而诱人的前景,目前已提出庞大的需要在月球基地内研制的生物制品与特殊材料的清单。月球将成为新的生物制品和特殊材料的研制、开发和生产的基地;月球是人类唯一的、庞大而稳固的“天然空间站”,是人类征服太阳系、开展深空探测的前哨阵地和转运站。



图 11-7 1969 年 7 月人类首次登月

在月球上建立永久性“地球村”,是人类向外层空间发展的第一个目标。月球的矿产资源、能源资源和特殊资源将对人类社会的可持续发展发挥长期稳定的支撑作用,地-月体系不仅是一个统一的自然体系,而且在人类社会的可持续发展方面,也将构成一个统一的整体。

科学家指出,要开发月球必须对月球进行全面的探测(图 11-8),了解月球的资源,并逐步对资源进行开发。月球的矿产资源极为丰富,地球上最常见的 17 种元素,在月球上比比皆是。以铁为例,仅月面表层 5 cm 厚的沙土就含有上亿 t 铁,而整个月球表面平均有 10 m 厚的沙土。月球表层的铁不仅异常丰富,而且便于开采和冶炼。据悉,月球上的铁主要是氧化铁,只要把氧和铁分开就行;此外,科学家已研究出利用月球土壤和岩石制造水泥和玻璃的办法。在月球表层,铝的含量也十分丰富。

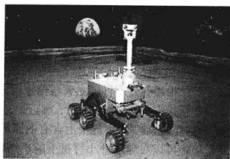


图 11-8 探月车示意图

月球土壤中还含有丰富的氦-3,利用氘和氦-3 进行的氦聚变可作为核电站的能源,这种聚变不产生中子,安全无污染,是容易控制的核聚变,不仅可用于地面核电站,而且特别适合宇宙航行。据悉,月球土壤中氦-3 的含量估计为 715 000 t。从月球土壤中每提取 1 t 氦-3,可得到 6 300 t 氢、70 t 氮和 1 600 t 碳。从目前的分析看,由于月球的氦-3 蕴藏量大,对于未来能源比较紧缺的地球来说,无疑是雪中送炭。许多航天大国已将获取氦-3 作为开发月球的重要目标之一。

11.5 中国开展月球探测的初步规划

据相关资料报道,根据我国科学技术进步水平、综合国力和国家整体发展战略,参考世界各国“重返月球”的战略目标和实施计划,近期我国的月球探测应以不载人月球探测为宗旨,分为“环、落、回”三个发展阶段:

第一阶段(环)(环月探测):研制和发射我国第一个月球探测器,利用月球探测卫星,对月球进行全球性、整体性与综合性探测。主要目标是:获取月球三维立体图像;勘察月球重要矿产资源的分布特点与规律;勘测月壤的厚度与核聚变发电燃料氦-3的分布与资源量;探测地-月空间环境;并对月球表面的环境、地貌、地形、地质构造与物理场进行探测。

第二阶段(落):月面软着陆器探测与月球车月面巡视勘察发射月球软着陆器,试验月球软着陆和月球车技术,就地勘测月球资源,开展月球基地天文观测,并为月球基地的选择提供基础数据。

第三阶段(回):月面软着陆与采样返回发射月球软着陆器,对着陆区的地形、地质构造岩石类型、月壤剖面、月球内部结构等进行就位探测;发射小型采样返回舱,采集关键性月球样品返回地球。

通过环月卫星探测,月面软着陆探测与月球车勘察,月面软着陆探测与采样返回的实施,为月球基地的选择提供基础数据,为载人登月和月球基地建设积累经验和技术。我国在基本完成不载人月球探测任务后,根据当时国际上月球探测发展情况和我国的国情国力,择机实施载人登月探测。

11.6 宇宙资源的终极目标

宇宙资源开发利用的终极目标应该是全人类实现资源共享,做到用宇宙资源养育地球人。

俄罗斯科学家已为人们描绘了一幅关于太空开采的美丽图画。

据俄塔社报道,莫斯科国立大学国家天文研究所月球与行星研究室主任、国际天文协会成员弗拉季斯拉夫·舍甫琴柯认为,靠近地球轨道有近200颗小行星可以实际利用。一个直径1 km的这样的“金属”小行星上含有的原料是全世界一年钢产量所需原料的5倍。到20世纪四五十年代可以对地球外小行星上的矿产资源进行工业开采。当21世纪中叶地球上多数矿产资源枯竭的时候,人类可以使用清洁的太空能源。舍甫琴柯说,只要载重10 t的航天飞机飞两三次就可保证全人类一年的能源供应。这样,星际开采的花费只是现在的核电站发电成本的1/10。

俄罗斯科学院院士埃里克·加利莫夫则认为,月球可保证人类未来数千年的能源供应,因为月球表面下蕴藏的氦-3多达5亿t。

事实上,从宇宙的形成过程和人类文明的演变进化来看,人们应该珍惜今天生存的美丽家园,更应该从不同的角度改变我们的生活环境和生活方式,使人们的存在和生活,更富有价值和更有质量。为了克服人类迟早要面对的资源短缺难题,加大太空科学技术的研发力度,创造一个全新的有益于人类的生存规则和秩序,充分使用其他星球上的矿产资源,使人类与贫困和饥饿及其战争彻底告别。可以相信,未来将会有更多的志士仁人,从事宇宙资源开发事业。

参考文献

- [1] 文先保. 海洋开采. 北京: 冶金工业出版社, 1996
- [2] 古德生, 李夕兵等. 现代金属矿床开采科学与技术. 北京: 冶金工业出版社, 2006
- [3] 李德成. 采矿概论. 北京: 冶金工业出版社, 1998
- [4] 徐永圻. 采矿学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003
- [5] 王海峰, 谭亚辉等. 原地浸出采铀井场工艺. 北京: 冶金工业出版社, 2002
- [6] 王清明. 我国水溶采矿技术的发展. 中国井矿盐, 1999年第30卷第5期 Vol. 30 No. 5
- [7] 卡明斯, 吉文. 采矿工程手册(5)·特殊采矿方法. 北京: 冶金工业出版社, 1981
- [8] 唐川林, 廖振方. 滨海砂矿开采新方法的研究. 重庆大学学报, 1999, 22(3)
- [9] 建设工程项目管理规范(G/T50326-2001). 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
- [10] 工程建设质量控制. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998
- [11] 供水水文地质钻探与凿井操作规程(CJJ13-87). 北京: 中国建筑工业出版社, 1987
- [12] 刘维阁. 江西铜矿山二次资源合理开发与利用. 江西地质, 1999, 13(4)
- [13] 杨兰和, 梁杰, 余力. 煤炭地下气化新工艺的试验研究. 中国矿业大学资源与环境科学学院, 2003
- [14] 罗梅. 加速发展地浸与堆浸技术开发我国的矿产资源. 铀矿地质, 1999, 15(4)
- [15] 张祖培. 煤炭地下气化技术. 长春科技大学(互联网交流资料), 2006
- [16] 王昌汉. 就地破碎浸矿法的五性及使用准则[C]. 1997全国浸矿技术学术会议论文集, 1997.5
- [17] 王昌汉. 溶浸采铀(矿)[M]. 北京: 原子能出版社, 1998
- [18] 王昌汉. 就地破碎溶浸采矿法几个关键技术的探讨. 南华大学学报(理工版), 2001, 15(2): 13-15
- [19] 汤洵忠. 用原地浸析法回收离子型稀土露天残矿. 矿冶工程, 1998, 18(4)
- [20] 汤洵忠, 李茂南. 我国离子型稀土矿开发的科技进. 矿冶工程, 1999, 19(2)
- [21] 《采矿手册》编辑委员会. 采矿手册. 北京: 冶金工业出版社, 1988
- [22] 张明黔. 化学矿床特殊开采方法. 重庆: 重庆大学, 1987
- [23] 张先尘. 采矿科技发展趋势探讨. 煤炭学报, 1997(增刊)
- [24] 孙茂远等. 煤层气开发利用手册. 北京: 煤炭工业出版社, 1998
- [25] 陈均海. 对非金属矿床地下开采方法特点的探讨. 非金属矿, 1986(2)
- [26] 王西文. 中国溶浸采矿现状和发展前景, 未来采矿发展趋势和展望. 第十四届世界采矿大会. 北京, 1990
- [27] Robert stefanko. Coal Mining Technology Theory and Practice, Society of Mining Engineering of the American Institute of Mining. Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., 1983
- [28] World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, 1987
- [29] Singer D A, Mosier D L. A Review of Regional Mineral Resource Assessment Methods. Economic Geology, 1981, 76
- [30] Under Achievements. Mining Magazine, 2002, 186(4)
- [31] German Mining Technology. Mining Magazine, 1999, 180(6)
- [32] Bath A R. Deep Sea Mining Technology; Recent Developments and Future Projects, 1991
- [33] Earney F C E. Technology and Economics of Deep Seabed Minerals, 1990

- [34] Anon, MSHA. Department of Labor. Mine Safety and Health Administration, Fatality Information – Fatal Grams, 1999
- [35] Robert W Bartlett. Solution Mining, Gordon and Breach Science Publishers, 1998
- [36] Terkel Rosenqvist. Principles of Extractive Metallurgy. Tapir Forlag, 2 edition, 2004
- [37] Scott And Craven, John P [Editors] Allen (Author). Alternatives in Deep sea Mining. University of Hawaii, 1979
- [38] Hans – Dieter Schilling. Coal Gasification; Existing Processes & New Developments, Springer, 1990
- [39] Mark Kurlansky. Salt; A World History. Penguin (Non – Classics), 2003
- [40] Travis L, Fox, Frederick D, Plumlee, Geoffrey S Hudson. Metal Mining and the Environment (AGI Environmental Awareness Series). American Geological Institute, 1999
- [41] Raymond L Lowrie (Editor). SME Mining Reference Handbook. Metallurgy, and Exploration (U. S.) Society for Mining, 2002
- [42] [http://www. geo_energy. org/information](http://www.geo_energy.org/information)
- [43] [http://www1. eere. energy. gov/geothermal](http://www1.eere.energy.gov/geothermal)
- [44] [http://content. answers. com/main/content/img/McGrawHill/Encyclopedia/images/](http://content.answers.com/main/content/img/McGrawHill/Encyclopedia/images/)